

Energieentwertung erfassbar machen

Konzeption und Evaluation eines curriculumorientierten
Lehrgangs mit Fokus auf Energietransfer und
Visualisierung mittels Infrarotkamera

Von der Fakultät für Mathematik und Physik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation von

Larissa Greinert

2020

Referentin: Jun. Prof. Dr. Susanne Weßnigk
Korreferent: Prof. Dr. Andreas Nehring
Korreferent: Prof. Dr. Jeffrey Nordine
Tag der Promotion: 08.05.2020

„Proposing a teaching approach [for the energy concept] feels a somewhat risky undertaking, [...] [like tiptoeing through a minefield]. Perhaps a metaphor of trying to dodge sniper fire would be more apposite. But, to make progress, it seems necessary to offer proposals that can be discussed and improved, rather than simply to rehearse the issues and difficulties” (Millar, 2014).

Teile dieser Arbeit sind bereits in Greinert und Weßnigk (2017), Greinert und Weßnigk (2019) und Greinert und Weßnigk (2020, im Druck) veröffentlicht worden.

Zusammenfassung: Energie ist eines der wichtigsten Konzepte der Naturwissenschaften und der Aufbau eines angemessenen Energieverständnisses ein wesentliches Ziel schulischer Bildung. Jedoch ist die Konzeptbildung in Bezug auf die Aspekte Energieerhaltung und -entwertung mit Schwierigkeiten verbunden. Als Ursache werden häufig die von Verbrauch geprägten Alltagserfahrungen genannt, die dem Erhaltungsprinzip scheinbar widersprechen. Um die Energieerhaltung für Lernende erfassbar zu machen, scheint es notwendig, Entwertungsvorgänge näher zu betrachten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Lehrgang für den Anfangsunterricht Energie entwickelt, der Entwertungsprozesse fokussiert. Ein zentraler Gedanke bei der Konzeption des Lehrgangs ist die Betrachtung des Energietransfers in die Umgebung als Teil von Entwertungsvorgängen. Dieser Fokus kann mit Hilfe von Infrarotkameras visuell gestützt werden. Zur Untersuchung der Lernwirksamkeit des entwickelten **Lehrgangs** nach dem didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* sowie des Einflusses einer Visualisierung der Vorgänge mittels **IR-Kamera** werden im Rahmen eines 2x3-Designs zwei Studien durchgeführt.

Bei der ersten Studie **EmIR** handelt es sich um eine Vergleichsstudie, in der die Lernwirksamkeit des Einsatzes einer IR-Kamera hinsichtlich des Verständnisses für die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung untersucht wird. Hierfür absolvieren zwei 7. Klassen (N = 48) den entwickelten Lehrgang im Kontrollgruppendesign, wobei eine Klasse zum Experimentieren zusätzlich eine IR-Kamera nutzt. Um identische Lerngelegenheiten in beiden Gruppen zu gewährleisten, erfolgt hier zunächst bewusst keine mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang. Durch diese Studie können darüber hinaus Erkenntnisse über den Umgang sowie die Auseinandersetzung von Lernenden mit Infrarotbildmaterial gewonnen werden, die in der nachfolgenden Studie berücksichtigt werden.

In der Folgestudie **EmIR+** erfolgt eine mediendidaktische Einbettung der Infrarotkamera in den entwickelten Lehrgang. In diesem Rahmen führen die Lernenden unter anderem einen IR-Kameraführerschein durch. Ziel dieser Studie ist die Untersuchung des Einflusses der mediendidaktischen Einbettung auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung. Darüber hinaus wird in dieser Studie die Lernwirksamkeit des Lehrgangs selbst, ohne mediale Stützung durch die IR-Kamera, untersucht. Hierfür wird der entwickelte Lehrgang sowohl ohne Verwendung der Infrarotkamera als auch mit mediendidaktisch eingebetteter Infrarotkamera jeweils in drei 7. Klassen durchgeführt. Zusätzlich werden von drei Klassen Daten erhoben, die am „traditionellen“ Energieunterricht teilnehmen (N = 207).

Die Datenerhebung erfolgt im Mixed-Methods-Design, wobei neben quantitativen Daten eines Energietests ebenfalls von einer Subgruppe (N = 32) qualitative Interviewdaten erhoben werden. In der vorliegenden Arbeit wird darüber hinaus eine Kombination der Auswertungsverfahren der qualitativen Daten vorgenommen.

Zusammenfassend kann sowohl in den Gruppen, die im neu entwickelten Energielehrgang unterrichtet wurden, als auch bei der „traditionellen“ Energieunterrichtsgruppe eine signifikante Steigerung im Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung von Pretest zu Posttest beobachtet werden. Ein Mehrgruppenvergleich zeigt, dass die Lehrgangsgruppen unabhängig vom Einsatz der IR-Kamera ein signifikant höheres Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung erreichen als die traditionelle Energieunterrichtsgruppe. Während sich ein Effekt des Einsatzes der IR-Kamera in den Lehrgangsgruppen beim Aspekt Entwertung ausschließlich in den Interviewdaten zeigt, ist durch die mediendidaktische Einbettung der Infrarotkamera eine Steigerung im Verständnis für Energieerhaltung feststellbar, die sich sowohl in den Interviewdaten als auch in den Energietestdaten zeigt.

Insgesamt zeigt sich durch den entwickelten Lehrgang nach dem didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* eine wesentliche Steigerung im Verständnis für Energieentwertung gegenüber dem traditionellen Energieunterricht. Die mediendidaktische Einbettung im Sinne einer Abstimmung des Lehrgangs auf die IR-Kamera führt zu einer Steigerung im Verständnis für Energieerhaltung. Ebenfalls gibt es Hinweise darauf, dass der Einsatz einer IR-Kamera das Verständnis für Energieentwertung zusätzlich unterstützt.

Schlagworte: *Energieentwertung, Energielehrgang, Infrarotkamera*

Abstract: Energy is one of the most important concepts in science and building a proper understanding of energy is an essential goal of school education. However, the development of concepts regarding energy conservation and dissipation is difficult to understand for students. One reason for this is the consumption-related everyday experience that seems to contradict the conservation principle. In order to make it possible for students to get a deeper understanding of energy conservation, the dissipation processes must be considered as well.

Within this thesis, an energy learning sequence for 7th grade middle school students was developed, which focuses on dissipation to support the students' understanding regarding these aspects of the energy concept. A central component of this energy sequence is the observation of the energy transfer into the environment as part of the dissipation processes by using thermal imaging. Using a 2x3 factorial design, two studies were conducted to analyze the effectiveness of the energy sequence according to the didactic concept "energy dissipation with focus on transfer" as well as the impact of visualizing energy dissipation by thermal imaging on the knowledge in use¹ regarding energy dissipation and conservation.

The first study EmIR was a comparative study in which the effects of thermal imaging regarding the learning gain were examined in terms of energy dissipation and conservation. For this purpose, two 7th grade classes (n=48) completed the developed energy sequence in a control group design, whereby one class additionally used thermal imaging for experimenting. In order to ensure identical learning opportunities in both groups, the thermal imaging was not further embedded in the course (e.g. by media didactic sessions). This study provided insights into the handling and interpretation of thermal imaging data by students, which were considered in the following study.

Within the second study, thermal imaging was embedded in media didactic sessions, whereby the students obtained a "thermal imaging-license" during the energy sequence. The aim of this study was to investigate the influence of media didactic embedding of thermal imaging on the knowledge in use regarding energy dissipation and conservation. In addition, within this study the learning gain of the energy sequence itself, without media support by thermal imaging, was analyzed. For this purpose, the energy sequence was conducted in three 7th grade classes respectively and additional data was collected from 3 classes which were taught according to a "traditional" energy sequence (n=207).

¹ In this thesis "knowledge in use" regarding energy degradation and conservation means that students can describe and explain phenomena taking into account these aspects and use them to solve problems.

In summary, a significant increase in knowledge in use regarding energy dissipation and conservation was observed in all study groups. However, a significantly better knowledge of energy dissipation and conservation was found in the group that was taught the newly developed energy learning sequence with and without thermal imaging as compared to the group being taught the “traditional” energy sequence.

While an additional effect of thermal imaging in terms of learning gain regarding energy dissipation was only found in the interview data, a significant increase in knowledge in use regarding energy conservation principle was also shown in the energy test data of the group using didactically embedded thermal imaging in comparison to the group without thermal imaging.

In conclusion, the two studies demonstrate that the developed energy sequence according to the didactic concept "energy dissipation with focus on transfer" leads to an increase of knowledge in use of energy dissipation and conservation as compared to a traditional energy learning sequence. By didactically embedding thermal imaging in the energy sequence, the knowledge in use regarding energy conservation can be improved significantly. Furthermore, there is first evidence that thermal imaging additionally supports the knowledge of energy dissipation.

keywords: *energy dissipation, energy learning sequence, thermal imaging*

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
2	Energie	15
2.1	Physikalische Grundlagen: Energie als Erhaltungsgröße bei dissipativen Prozessen	16
2.2	Fachdidaktische Perspektive	18
2.3	Curriculare Vorgaben	21
2.4	Herausforderungen beim Lernen des Energiekonzepts.....	24
2.4.1	Schülervorstellungen	24
2.4.2	Identifizierte Lernschwierigkeiten	27
2.5	Entwicklung des Energieverständnisses.....	30
2.6	Das didaktische Konzept: <i>Energieentwertung mit Fokus auf Transfer</i>	33
3	Infrarotkamera	35
3.1	Physikalische Grundlagen.....	38
3.2	Die Infrarotkamera als digitales Messinstrument	40
3.2.1	Einfluss- und Störfaktoren.....	41
3.2.2	Die Infrarotkamera FlirOne	42
3.3	„Sehen“ mit einer Infrarotkamera	44
3.3.1	Die Infrarotkamera als Sehbereichserweiterung.....	44
3.3.2	Psychologischer Informationsverarbeitungsprozess und Bilderverstehen.....	45
3.4	Herausforderungen beim Lernen mit Infrarotbildmaterial.....	49
3.4.1	Vorstellungen zu unsichtbarer Strahlung	49
3.4.2	Vorstellungen zur Infrarotkamera und zu Infrarotbildmaterial	50
3.4.3	Wahrnehmung und Interpretation.....	52
3.5	Die Infrarotkamera in Lehr-Lern-Prozessen	56
3.5.1	Potenzial aus mediendidaktischer Sicht	56
3.5.2	Didaktisches Potenzial in Lehr-Lern-Prozessen	57
3.5.3	Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht	58
3.6	Die Infrarotkamera als mediale Unterstützung des didaktischen Konzepts <i>Energieentwertung mit Fokus auf Transfer</i>	62
3.6.1	Aussagewert von Infrarotbildmaterial.....	64
4	Desiderat: Das Projekt „Energieentwertung erfassbar machen“	67
4.1	Forschungsfragen.....	70
4.2	Forschungshypothesen	73
5	Konzeption des Lehrgangs <i>Energieentwertung mit Fokus auf Transfer</i>	75
5.1	Adaptiertes Kontomodell: <i>Fokus auf Transfer</i>	77

5.2	Konzeption des Lehrgangs.....	82
5.2.1	Temperatur als Messgröße (1. Doppelstunde)	82
5.2.2	Einführung in den Themenbereich Energie (2. Doppelstunde).....	82
5.2.3	Energieformen (3. und 4. Doppelstunde)	83
5.2.4	Energieumwandlung (5. und 6. Doppelstunde)	84
5.2.5	Energietransfer (7. und 8. Doppelstunde)	85
5.2.6	Energieentwertung bei Energieumwandlungs- und Übertragungsprozessen (9. bis 11. Doppelstunde).....	85
5.2.7	Temperatur im Teilchenmodell (12. Doppelstunde)	86
5.2.8	Energieentwertung und Energieerhaltung (13. und 14. Doppelstunde)	87
6	Methode.....	89
6.1	Forschungsdesign.....	91
6.2	Datenerhebung.....	94
6.2.1	Quantitative Daten: Energietest.....	95
6.2.2	Qualitative Daten: Interviews.....	97
6.2.3	Lernendenvariablen	104
6.2.4	Datenanalyse.....	105
7	Die Studie EmIR: Energieentwertung mit der IR-Kamera.....	109
7.1	Design der Studie EmIR	109
7.2	Durchführung und Stichprobenbeschreibung	111
7.3	Ergebnisse der Studie EmIR.....	112
7.3.1	Analyse der Lernendenvariablen.....	112
7.3.2	Ergebnisse zu den Forschungsfragen.....	113
7.4	Zusammenfassung und Diskussion der Studie EmIR.....	132
8	Die Studie EmIR+: Energieentwertung mit der IR-Kamera + mediendidaktische Einbettung ..	135
8.1	Design der Studie EmIR+	136
8.2	Durchführung und Stichprobenbeschreibung	138
8.3	Maßnahmen zur mediendidaktischen Einbettung der Infrarotkamera.....	139
8.3.1	Der IR-Kameraführerschein.....	141
8.4	Ergebnisse der Studie EmIR+	147
8.4.1	Reliabilitätsanalyse und Trennschärfe der Messinstrumente.....	149
8.4.2	Analyse der Lernendenvariablen.....	152
8.4.3	Ergebnisse zu den Forschungsfragen.....	153
8.5	Zusammenfassung und Diskussion der Studie EmIR+.....	195

9 Zusammenfassung der Studien EmIR und EmIR+	199
9.1 Ergebnisse der übergeordneten Forschungsfrage.....	199
9.2 Diskussion und Reflexion.....	208
9.3 Ausblick	216
Abkürzungsverzeichnis.....	219
Literaturverzeichnis.....	221
Anhang.....	232

1 Einleitung

„Research on teaching and learning science, [...] reveals that students' understanding of key basic ideas of energy is somewhat limited. It seems that a major reason for this is how energy is taught in schools and at the tertiary level“ (Duit, 2014, S. 67)

Ein wesentliches Ziel des Physikunterrichts ist der Aufbau einer naturwissenschaftlichen Grundbildung, zu der unter anderem die Entwicklung eines elaborierten Energieverständnisses gehört. In verschiedenen Bundesländern sind die Aspekte Energieerhaltung und -entwertung bereits im Anfangsunterricht von großer Bedeutung und somit zentraler Bestandteil der schulischen Energiebildung (Kultusministerkonferenz, 2015; Ministerium für Schule und Weiterbildung, NRW, 2008; Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung Bayern, 2004). Jedoch ist aus fachdidaktischen Studien bekannt, dass die Verständniserwicklung innerhalb des Energiekonzepts insbesondere bei diesen Aspekten mit Schwierigkeiten verbunden ist (Chabalengula, Sanders & Mumba, 2012; Driver & Warrington, 1985; K. Neumann, Viering & Fischer, 2010; Viering, 2012). Lernende können zwar häufig das Erhaltungsprinzip replizieren, es jedoch nur schwer auf Alltagsphänomene anwenden (Driver & Warrington, 1985; Tatar & Oktay, 2007). Duit (2014) nennt im obigen Zitat als Hauptursache für diese Schwierigkeiten die Art und Weise, wie Energie in der Schule unterrichtet wird; viele Einführungen beschränken sich zudem auf den Aspekt der Erhaltung, wobei die lebensweltlichen Erfahrungen der Lernenden, speziell der Energieverbrauch, nicht oder nicht ausreichend thematisiert werden (Schlichting, 2000). Wird Energieverbrauch jedoch als qualitative Veränderung der Energie im Sinne einer Wertminderung gesehen, steht diese Erfahrung nicht im Widerspruch zum Mengenerhalt. Dieser Vorgang wird in der Fachdidaktik durch den Begriff Energieentwertung beschrieben. Um bei Alltagsphänomenen das Erhaltungsprinzip erkennbar zu machen, scheint es daher notwendig, Entwertungsvorgänge zu betrachten (Duit, 2014; Millar, 2014).

Ein möglicher Ansatz für den Umgang mit den Verständnisschwierigkeiten ist es, die beiden Aspekte *Entwertung* und *Erhaltung* zeitlich verzahnt zu thematisieren und als „*komplementäre Aspekte ein und derselben Klasse von Erfahrungen*“ (Schlichting & Backhaus, 1987, S. 15) aufzufassen. Dafür kann z.B. bei Umwandlungs- und Übertragungsprozessen der Fokus auf den Energiestrom in die Umgebung gelegt werden: Bei all diesen Prozessen wird ein Teil der Energie in die Umgebung übertragen (Millar, 2014). Diese Betrachtung ermöglicht es, den Mengenerhalt zu erkennen und zugleich den damit verbundenen Wertverlust zu erfassen.

Zudem schließt dieser Ansatz an das für Lernende eher verständliche Konzept des Energietransfers an (Behle & Wilhelm, 2017; K. Neumann et al., 2010). Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Lernwirksamkeit² dieses didaktischen Lösungsansatzes.

Als Herausforderung ergibt sich in diesem Zusammenhang, dass der Energietransfer bzw. die damit verbundene, oft geringe Temperaturänderung nur schwer durch traditionelle Instrumente wie Thermometer messbar ist. Zudem ist die Konzeptualisierung von thermischen Prozessen wie Konduktion für Lernende schwierig, was dem Aufbau von neuem bzw. verknüpftem Wissen im Wege stehen kann (Clough & Driver, 1985; Harrison, Grayson & Treagust, 1999; vgl. auch Yeo & Zadnik, 2001). Diese Schwierigkeiten könnten überwunden werden, wenn Lernende Prozesse wie die Wärmeleitung sehen könnten (Erickson, 1979). Infrarotkameras (kurz: IR-Kameras) können genau das leisten. Mit ihrer Hilfe lässt sich das Oberflächentemperaturprofil in einem begrenzten Observationsbereich visualisieren, sodass eine Temperaturerhöhung direkt beobachtbar wird. Somit haben IR-Kameras das Potenzial, visuelle Evidenz für den Energietransfer in die Umgebung im Rahmen von Entwertungsprozessen zu liefern. Das digitale Medium IR-Kamera kann daher das didaktische Konzept, bei Energieentwertungsprozessen den Energietransfer zu fokussieren, medial unterstützen. Die tatsächlichen Auswirkungen einer Visualisierung der Vorgänge mittels IR-Kamera auf den Lernerfolg wurden bislang jedoch nur in geringer Stichprobengröße und in informeller Lernumgebung untersucht. Als weiteres Ziel dieser Arbeit ergibt sich demnach die Untersuchung des Einflusses der IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung.

Insgesamt widmet sich die vorliegende Arbeit damit der Entwicklung sowie quasi-experimentellen Untersuchung eines curriculumorientierten Energielehrgangs, der bei Umwandlungs- und Übertragungsprozessen den Fokus der Betrachtung auf den Energietransfer in die Umgebung legt. Hierbei sollen ebenfalls die Auswirkungen der Visualisierung dieser Vorgänge mittels der IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung untersucht werden.

Im Vorfeld der Entwicklung des Energielehrgangs erfolgt zunächst eine theoriegeleitete Auseinandersetzung mit dem Energiekonzept, wobei die Relevanz der Aspekte Energieentwertung und -erhaltung als Lerngegenstand des Physikunterrichts der Mittelstufe dargelegt sowie

² Hierbei wird in der vorliegenden Arbeit unter Lernwirksamkeit bzw. Lernerfolg eine Steigerung im Verständnis für die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung verstanden. Dabei ist mit *Verständnis* gemeint, dass die Lernenden Phänomene mithilfe dieser Aspekte beschreiben und erklären können sowie diese zur Problemlösung heranziehen können (vgl. Kapitel 4.1).

die mit dem Erlernen verbundenen Herausforderungen herausgestellt werden. Das didaktische Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* ist Folgerung dieser Überlegungen (vgl. Kapitel 2). Im Rahmen der Auseinandersetzung mit dem digitalen Messinstrument IR-Kamera werden zunächst die fachlichen Grundlagen, die für ein Verständnis der Funktionsweise der IR-Kamera notwendig scheinen, beleuchtet, eine fachlich geprägte Analyse des IR-Bildmaterials vorgenommen sowie ein Modell zum Bildverstehen vorgestellt. Ein Schwerpunkt der Betrachtung wird auf die mit dem Einsatz verbundenen Herausforderungen aus didaktischer Sicht gelegt. Anhand dieser Überlegungen werden Schlussfolgerungen für den Einsatz der IR-Kamera innerhalb des didaktischen Konzepts gezogen (vgl. Kapitel 3).

Auf Grundlage der theoretischen Überlegungen sowie der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit können die Forschungsfragen konkretisiert und Forschungshypothesen abgeleitet werden (vgl. Kapitel 4). Die Grundgedanken der Konzeption des entwickelten Lehrgangs werden in Kapitel 5 vorgestellt.

Die Untersuchung der Lernwirksamkeit des entwickelten Lehrgangs hinsichtlich Energieentwertung und -erhaltung sowie des Einflusses der IR-Kamera erfolgt im 2x3-Design im Rahmen von zwei Studien (Kapitel 6).

Die Vergleichsstudie **EmIR** untersucht zunächst den Einfluss der IR-Kamera, wenn diese im entwickelten Lehrgang lediglich zusätzlich zum Experimentieren eingesetzt wird (Kapitel 7). Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Studie wird in der Folgestudie **EmIR+** eine mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera vorgenommen und es werden Maßnahmen zur Intensivierung der Auseinandersetzung mit dem Lehrgegenstand IR-Kamera getroffen, wobei es sich unter anderem um die Entwicklung eines IR-Kameraführerscheins handelt. In dieser Studie wird die quasi-experimentelle Untersuchung des Lehrgangs mit und ohne mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera vorgenommen (Kapitel 8). Die Datenerhebung erfolgte in insgesamt zehn 7. Klassen (und sechs Lehrpersonen) niedersächsischer Gymnasien im Mixed-Methods-Ansatz und umfasst neben quantitativen Energietestdaten ebenfalls qualitative Interviewdaten. In der vorliegenden Arbeit wird über die Kombination der Methoden der Datenerhebung hinaus eine Kombination der Auswertungsverfahren der qualitativen Daten gewählt.

Abschließend werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen hinsichtlich des Verständnisses für Entwertung und Erhaltung studienübergreifend analysiert und vor dem Hintergrund der Zielsetzung diskutiert (vgl. Kapitel 9).

2 Energie

Als naturwissenschaftliches Querschnittskonzept ist Energie sowohl aus fachlicher Sicht als auch bildungspolitisch auf internationaler Ebene eines der wichtigsten Konzepte der Naturwissenschaften, welches verschiedene Disziplinen miteinander verbindet (Chen et al., 2014; Driver & Millar, 1986; Duit, 2014). Die Allgegenwertigkeit von Energie in den Medien, wie beispielweise die Problematisierung der Energieversorgung, verdeutlicht die Relevanz des Energiekonzepts auch für gesellschaftliche Themen. Die Einsicht, warum Energie als Erhaltungsgröße gespart werden muss oder gar knapp werden könnte, ist nur möglich, wenn Konzepte wie Energieentwertung verstanden werden (Duit, 2014). Daher sehen Driver und Millar (1986) ein grundlegendes Verständnis des Energiekonzepts als Voraussetzung für das Erfassen dieser Gesellschaftsrelevanz.

Diese besondere Rolle wird ebenfalls auf schulischer Ebene deutlich; in den nationalen Bildungsstandards für das Fach Physik ist Energie Teil der vier Basiskonzepte (KMK, 2005) und wird im niedersächsischen Kerncurriculum als themenübergreifende Leitlinie ausgewiesen, die alle anderen Themenbereiche berührt (Kultusministerkonferenz, 2015). Der Aufbau eines elaborierten Energieverständnisses ist demnach wesentliches Ziel des Physikunterrichts. Jedoch ist der Erwerb eines adäquaten Energieverständnisses aufgrund der Abstraktheit des Energiebegriffs sowie der widersprüchlichen Verwendung in Wissenschaft und Alltag für Lernende mit Herausforderungen verbunden (Millar, 2005). Dies zeigt sich insbesondere in den bekannten Schülervorstellungen zum Energiekonzept sowie den Ergebnissen von Untersuchungen zum Energieverständnis.

In diesem Kapitel sollen nach einer fachlichen³ sowie fachdidaktischen Betrachtung des Energiekonzepts zunächst die curricularen Vorgaben⁴ beleuchtet werden, da die Entwicklung eines Lehrgangs für den schulischen Anfangsunterricht nicht unabhängig vom Curriculum erfolgen kann. Ausgehend von den Herausforderungen beim Lernen des Energiekonzepts wird das didaktische Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Energietransfer* vorgestellt.

³ In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Betrachtungen, die für ein wissenschaftliches Verständnis von Energie in der gymnasialen Mittelstufe relevant sind.

⁴ Da der Lehrgang für die Implementation in den Unterricht der 7./8. Jahrgangsstufe nds. Gymnasien entwickelt wurde, liegt der Schwerpunkt der Betrachtungen auf dem Kerncurriculum für das Gymnasium der Schuljahrgänge 5-10 für Naturwissenschaften in Niedersachsen.

2.1 Physikalische Grundlagen: Energie als Erhaltungsgröße bei dissipativen Prozessen

Energie ist eine Bilanzierungsgröße, die einem System⁵ aus einem oder mehreren Objekten eine numerische Kennzahl zuordnet (Halliday, Resnick & Walker, 2005). Die Energie eines Systems ändert sich immer dann, wenn dieses beispielweise durch eine Krafteinwirkung mit einem anderen wechselwirkt. Dabei nimmt die Energie des einen Systems ab, während die Energie des anderen Systems zunimmt: Energie wird übertragen. Ein solcher Energietransfer über eine Krafteinwirkung ist als *Arbeit* definiert. Darüber hinaus kann eine Änderung der Energie eines Systems ebenfalls Folge einer Zufuhr oder einem Entzug von Wärme sein, wobei unter *Wärme* der Energietransfer von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur verstanden wird (Lüders & Oppen, 2008). „*Während bei der Verrichtung von Arbeit mechanische Veränderungen stattfinden, ist die Übertragung von Wärme mit thermischen Änderungen verbunden*“ (Lüders & Oppen, 2008, S. 640). Dabei unterliegen die Veränderungen der Gesamtenergie eines Systems der Energieerhaltung (Meschede, 2002), wonach sich diese nur durch den Transfer von Energie in oder aus dem System ändert. Dies bedeutet, dass bei einem abgeschlossenen System, welches nicht mit anderen Systemen interagiert, die Energiemenge konstant bleibt (Halliday et al., 2005).

Treten bei mechanischen Vorgängen Wechselwirkungen zwischen Systemen durch Reibungskräfte auf, ändern sich Parameter wie Geschwindigkeit und Temperatur. Diese Vorgänge können am Beispiel eines Körpers auf der schiefen Ebene verdeutlicht werden. „*Der Körper mit der Masse m hat auf der Höhe h die kinetische Energie $E_{kin} = 0$ und die potenzielle Energie $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$. Die Potenzielle Energie befindet sich allerdings (noch) nicht im Körper, sondern im [...] Gravitationsfeld*“ (Schwarze, 2018, S. 32). Beim Herabrutschen nimmt der Körper die Energie aus dem Feld auf, sodass sich die Energie des Feldes verringert während die des Körpers um diesen Wert auf $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ steigt (ebd., S.32). Dabei wird durch Reibungsarbeit ΔW am Körper dessen Energie verringert: $E_{kin} - \Delta W$. Die abgeführte Reibungsarbeit wird vom System *Rampe/Umgebung* in Form von Wärme auf mikroskopischer Ebene

⁵ Als physikalisches System wird hier ein Element oder ein Zusammenschluss von Elementen wie beispielsweise atomaren Teilchen verstanden (Lüders und Oppen, 2008). Physikalische Systeme werden durch den Austausch mit der Umgebung, durch interne Größen und besondere Materialeigenschaften bestimmt. Thermodynamische Systeme werden mikroskopisch durch Orts- und Impulskoordinaten und deren Bewegungsgleichungen beschrieben, makroskopisch durch ihre globale zeitliche Entwicklung (Gleichgewichtssituation) und die resultierenden thermodynamischen Zustandsgrößen (Druck, Volumen, Temperatur, Entropie, innere Energie, Teilchenzahl etc., Ludwig, 1979).

aufgenommen: $E_{\text{Rampe/Umgebung}} + \Delta W$. Dieser als Dissipation bezeichnete Vorgang führt zu einer thermischen Veränderung, wobei Arbeit in Wärme umgewandelt wird (Lüders & Oppen, 2008). Er ist nicht vollständig reversibel und die Energie für das System nicht mehr nutzbar; d. h. die Energie der mikroskopischen Ebene kann nicht wieder an die makroskopische Ebene zurückübertragen werden. Damit hat der Wert der Energie abgenommen (Titz, 2013). Allein mit der Energieerhaltung ist die Unumkehrbarkeit der Richtung eines ablaufenden Prozesses jedoch nicht erklärbar, da sich die Gesamtenergie durch den Transfer nicht ändern würde. Der Vorgang ist nicht vollständig reversibel, da eine Entropieänderung stattgefunden hat.

Entropie ist ein Maß für die Zahl der erreichbaren Mikrozustände, die zum gleichen Makrozustand eines Systems führt. Je größer die Zahl der erreichbaren Mikrozustände eines Makrozustandes ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das System diesen Makrozustand annimmt (Meschede, 2002). Ein selbstständiger Übergang eines Zustands zu einem anderen findet nur statt, wenn dieser gleichwahrscheinlich oder wahrscheinlicher als der vorherige Zustand ist⁶. D. h. die Zahl der erreichbaren Mikrozustände muss zunehmen. Daraus folgt, dass die Entropie eines Systems nur gleichbleiben oder größer werden kann. Eine Abnahme der Entropie ist demnach in einem abgeschlossenen System nicht möglich (*2. Hauptsatz der Thermodynamik*, Meschede, 2002). Die Zustandsänderung findet solange statt, bis das System in den wahrscheinlichsten Zustand, also in den Zustand maximaler Entropie, übergegangen ist. Wird Energie durch Reibungskräfte an die mikroskopische Ebene übertragen, ist die Folge eine Temperaturerhöhung und damit eine Zunahme der Entropie des Systems. Eine Rückübertragung würde zu einer Entropieabnahme führen, weshalb der Vorgang spontan nicht auftritt. Die Änderung der intrinsischen Eigenschaft des Systems wird als Änderung der inneren Energie bezeichnet und setzt sich aus den kinetischen und potentiellen Energien der Atome und Moleküle (kurz: Mikrokörper) zusammen, die sich innerhalb der Objekte des Systems ungeordnet bewegen (Halliday et al., 2005). Innere Energie ist damit eine Zustandsgröße. Der *erste Hauptsatz der Thermodynamik* besagt, dass die Änderung der inneren Energie der Menge der zu- bzw. abgeführten Energie in Form von Wärme bzw. Arbeit entspricht (Titz, 2013). Dabei handelt es sich bei Arbeit und Wärme um Prozessgrößen.

⁶ Laut der Theorie der Schwingungserscheinungen kann ein System unter Umständen in einen weniger wahrscheinlichen Zustand übergehen, d. h. die Entropie abnehmen, jedoch nur um wenige Einheiten der Boltzmannkonstante (Meschede, 2002). Für größere Entropieänderungen gilt jedoch der 2. Hauptsatz.

2.2 Fachdidaktische Perspektive

Obwohl Energie keine Beschreibung eines Mechanismus oder Begründung für den Ablauf von Prozessen ist (Feynman, Leighton & Sands, 1963), handelt es sich allein durch die Eigenschaft als Erhaltungsgröße um ein überaus nützliches Konzept (Millar, 2014). Allerdings stehen alltägliche Aussagen wie „*Mach' bitte das Licht aus, unser Energieverbrauch ist zu hoch*“, in denen von Energie als verbrauchbarer Rohstoff⁷ gesprochen wird, im Widerspruch zur physikalischen Sichtweise der Energieerhaltung.

Wird Energie allerdings als quasi-materielle, fluide Substanz betrachtet, welche zwischen Orten hin- und herfließen und währenddessen ihre Form ändern kann, lässt sich diese Kluft zwischen lebensweltlicher und fachlich korrekter Bedeutung überbrücken (Duit, 1987; Duit & Häußler, 1994; Millar, 2014). Beim Fluidmodell handelt es sich um eine konzeptuelle Metapher (Wernecke, Schwanewedel & Harms, 2018). Auch wenn sich dieser Ansatz deutlich von der fachlich korrekten Sichtweise unterscheidet, „*it does have the major benefit of helping students use their intuition about fluids to bolster their sense that energy missing from one place must show up someplace else*“ (Nordine, 2016, S. 73). Der Fluidgedanke kann demnach helfen, Energie sprachlich und mental für Lernende greifbarer machen⁸.

Die sogenannte **Energiequadriga** knüpft gedanklich an das Fluidmodell an (Millar, 2014) und umfasst die Aspekte *Energieumwandlung*, *Energietransfer*, *Energieentwertung* und *Energieerhaltung*, welche als grundlegend für den Aufbau eines umfassenden Energieverständnisses gelten (vgl. Abbildung 1).

Die Aspekte sind eng miteinander verzahnt und somit nicht trennscharf (Duit, 2014). Der Aspekt *Energieformen* kommt in der Energiequadriga nicht explizit vor, jedoch erläutert Duit (1991), dass mit *Energieumwandlung* eine Umwandlung auf Ebene der Erscheinungsformen gemeint ist.

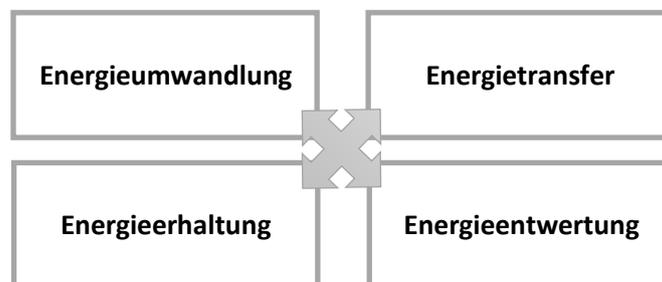


Abbildung 1: Energiequadriga (Duit, 2014)

⁷ Eine ausführliche Darstellung der Energievorstellungen und des Energieverständnisses in Abhängigkeit vom Alter der Schülerinnen und Schüler erfolgt in den Kapiteln 2.4 und 2.5.

⁸ Im Unterricht des entwickelten Lehrgangs (vgl. Kapitel 5) wurde nicht von Energie als Substanz bzw. Fluid gesprochen.

Am Beispiel eines schwingenden Pendels lassen sich die Aspekte näher spezifizieren. Wird dieses unter der Perspektive der **Energieerhaltung** betrachtet, so ändert sich zwar die Manifestation der Energie, es gilt jedoch der Mengenerhalt. Dem Modell folgend kann die Änderung der *Manifestation* mithilfe von Energieformen durch eine **Energieumwandlung** beschrieben werden (Duit, 2012): Höhenenergie wird in Bewegungsenergie umgewandelt. Bei einer längeren Betrachtung des Vorgangs lässt sich jedoch feststellen, dass die Pendelamplitude immer geringer wird. Die Energie des Pendels nimmt ab und scheint am Ende ganz *verbraucht* zu sein. Dieser vermeintliche Widerspruch von Alltagsprozessen zum Energieerhaltungssatz wird häufig als Ursache für Schwierigkeiten bei der Verständnisenwicklung innerhalb des Energiekonzepts benannt (Schlichting, 2000).

Bei jedem dissipativen Umwandlungs- und Übertragungsprozess wird ein Teil der Energie **entwertet**. Ein zentraler Gedanke der Energieentwertung ist dabei der irreversible, meist unbemerkte **Transfer** von Energie in die Umgebung.

Energietransfer als ein Teil von Energieentwertung

Ausgehend von der Energieerhaltung gilt: „*If something loses some energy, something else must have gained it*“ (Millar, 2014, S. 188). Interagieren zwei Systeme⁹ miteinander, so ist die Energieabnahme des einen Systems genauso groß wie die Energiezunahme des anderen. Hierunter kann sich Übertragung von Energie von einem System auf ein anderes vorgestellt werden (Kubsch, Nordine & Neumann, 2018).

Auch beim Pendeln interagieren Systeme miteinander (vgl. Abbildung 2); bei diesem Vorgang tritt sowohl an der Aufhängung des Pendels als auch in der Luft Reibung auf. Mikroskopisch betrachtet wird auf atomarer Ebene der ungeordneten Bewegung Arbeit zugeführt, wodurch die Temperatur beider Reibungspartner zunimmt. Diese Temperaturerhöhung ist ein Maß für die Erhöhung der inneren Energie der Reibungspartner. Infolge des Reibungsprozesses nimmt die Pendelenergie ab, während die Energie der unter *Umgebung* summierten Reibungspartner zunimmt. Es ist nicht möglich, die an die Umgebung übertragene Energie für das Pendeln

⁹ In Anlehnung an das National Research Council (2012) wird hier unter dem Begriff System didaktisch die Aufteilung der natürlichen, komplexen Welt in „kleine Portionen“ verstanden, welche die Untersuchung dieser erleichtern sollen.

zurückzuholen¹⁰, sie wird weitertransportiert und verteilt sich auf einen immer größer werdenden Raum.

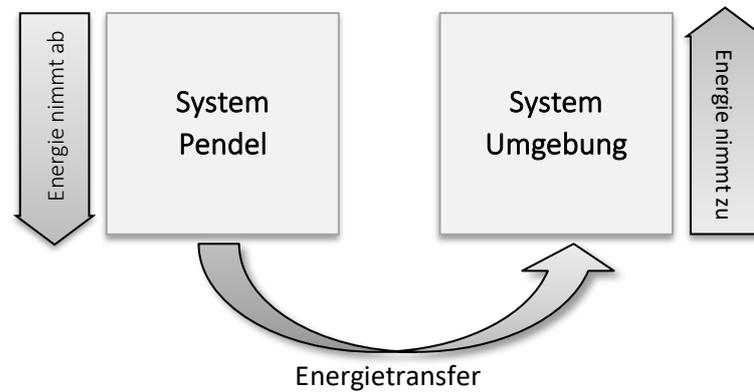


Abbildung 2: Energietransfer in die Umgebung beim Pendeln (angelehnt an die Darstellung von (Millar, 2014).

Diese Sichtweise verdeutlicht die enge Verbindung der Aspekte miteinander, da das Verständnis eines Aspekts durch die Berücksichtigung der anderen bedingt ist. Duit (2014) folgert daraus, dass in Unterrichtskonzepten alle Aspekte in geeigneter Weise Beachtung finden sollten.

Zur Ausbildung eines abstrahierten und integrierten Verständnisses von Energie ist ein Verständnis der Aspekte *Energieumwandlung*, *Energietransfer*, *Energieentwertung* und *Energieerhaltung* notwendig. Diese Aspekte sind eng miteinander verzahnt und somit nicht trennscharf. Im Einklang mit den Ergebnissen der fachdidaktischen Forschung bilden die Aspekte der **Energiequadriga die Grundlage** für die curricularen Vorgaben (K. Neumann, Viering, Boone & Fischer, 2013) und den in der vorliegenden Arbeit **neu konzipierten und weiterentwickelten Lehrgang** für den Anfangsunterricht Energie.

¹⁰ Die Irreversibilität von Prozessen kann in der Physik jedoch nicht mit Hilfe von Energie bzw. Energieerhaltung erklärt werden, hierfür wird die Entropie benötigt (Schlichting, 2000; vgl. Kapitel 2.1). Zur Wahrung der Adressatengerechtigkeit wurde den curricularen Vorgaben folgend das Konzept Entropie im Lehrgang nicht berührt.

2.3 Curriculare Vorgaben

Anlässlich der Ergebnisse internationaler Vergleichsstudien wurden in Deutschland Untersuchungen durchgeführt, die das deutsche Schulsystem auf internationaler Ebene einordnen sollten. Es zeigte sich, dass in Ländern, die in den Vergleichsstudien erfolgreicher waren, ein regelmäßiger nationaler Vergleich erfolgt, beispielsweise durch zentrale Prüfungen. Eine solche nationale Vergleichbarkeit erfordert einheitliche Maßstäbe. Die von der Kultusministerkonferenz entwickelten **Bildungsstandards** stellen einen solchen Maßstab für Qualitätssicherung und Schulevaluationen auf nationaler Ebene dar (KMK, 2019).

Die von der KMK (2005) herausgegebenen *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangstufe 10)* bilden die Grundlage der für das Fach spezifischen Anforderungen und umfassen die vier Kompetenzbereiche¹¹ *Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation* und *Bewertung*. Dabei gliedert sich der Kompetenzbereich Fachwissen in die vier Basiskonzepte *Wechselwirkung, System, Energie* und *Materie*, die die inhaltliche Basis für den Kompetenzerwerb in den übrigen drei Kompetenzbereichen bilden (KMK, 2005). Das Verständnis dieser vier Konzepte soll Schülerinnen und Schüler folglich dazu befähigen eine fundierte physikalische Grundbildung zu erlangen (K. Neumann et al., 2013).

Das Basiskonzept Energie wird näher spezifiziert:

Nutzbare Energie kann aus erschöpfbaren und regenerativen **Quellen** gewonnen werden. Für den **Transport** und bei der Nutzung von Energie kann ein **Wechsel** der **Energieform** bzw. des Energieträgers stattfinden. Dabei kann **nur ein Teil der eingesetzten Energie genutzt** werden. Die Gesamtheit der Energien **bleibt konstant**. Bei Körpern unterschiedlicher Temperatur findet ein Energiefluss von alleine nur von höherer zu niedrigerer Temperatur statt. (KMK, 2005, S. 9)

Neben den fachdidaktisch etablierten Aspekte *Formen, Umwandlung, Transfer, Entwertung* und *Erhaltung* (K. Neumann et al., 2013; vgl. Kapitel 2.2) wird hier zusätzlich von

¹¹ Im Kapitel 2.3 wird der Terminus des nds. Kerncurriculums verwendet und der Begriff „Kompetenzen“ genutzt (Kultusministerkonferenz, 2015). Die Bildungsstandards folgen der Definition des Begriffs nach Weinert, wonach „Kompetenzen [...] die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten [sind], um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können“ (KMK, 2005, S. 7).

Energiequellen gesprochen, die ebenfalls als grundlegend beim Erlernen des Energiekonzepts gelten (vgl. bspw. Millar, 2014)

Die Konkretisierung der landesweiten Bildungsstandards bilden die **Lehrpläne** der Bundesländer, auf dessen Grundlage der Unterricht in den einzelnen Fächern erteilt werden soll (Niedersächsischer Bildungsserver, 2019).

Im nds. Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5-10 im Fach Physik wird zwischen prozessbezogenen und inhaltsbezogenen Kompetenzen unterschieden. Die inhaltsbezogenen Kompetenzen sind in die Themengebiete Energie, Thermodynamik, Magnetismus und Elektrizität, Mechanik, Optik und Kernphysik gegliedert, wobei die Sonderrolle von Energie in den ergänzenden Erläuterungen als themenübergreifende Leitlinie herausgestellt wird, die alle anderen Themengebiete berührt (Kultusministerkonferenz, 2015).

Die inhaltsbezogenen Kompetenzen der Themenbereiche sind in die Doppeljahrgangsstufen 5/6, 7/8 und 9/10 unterteilt und bilden den Kompetenzerwerb bis zum Ende der jeweiligen Doppeljahrgangsstufe ab. Bis zum Ende von Jahrgang 6 sind im nds. Kerncurriculum noch keine Kompetenzen im Themenbereich Energie ausgewiesen. Am Ende von Jahrgang 8 heißt es:

Schülerinnen und Schüler

- verfügen über einen **altersgemäß ausgeschärfen Energiebegriff**.
- beschreiben verschiedene geeignete Vorgänge mithilfe von **Energieübertragungsketten**.
- ordnen der Energie die Einheit 1 J zu und geben einige typische Größenordnungen an.
- stellen **qualitative Energiebilanzen** für einfache **Übertragungs- bzw. Wandlungsvorgänge** auf.
- erläutern das Prinzip der **Energieerhaltung unter Berücksichtigung des Energiestroms in die Umgebung**.
- verwenden für die Energiestromstärke die Größenbezeichnung P sowie deren Einheit 1 W und geben typische Größenordnungen an. (Kultusministerkonferenz, 2015, S. 26)

Auch hier lassen sich Parallelen zur Energiequadriga ziehen. Herauszustellen ist zum einen, dass der Bilanzierungsgedanke bereits im Anfangsunterricht einen großen Stellenwert für den Kompetenzerwerb einnimmt und bei Umwandlungs- und Übertragungsvorgängen berücksichtigt werden soll. Zum anderen soll das Prinzip der Energieerhaltung *erläutert* werden, wobei mit *erläutern* in diesem Zusammenhang das Veranschaulichen und Verständlichmachen eines Sachverhalts durch *zusätzliche Informationen* gemeint ist (Kultusministerkonferenz, 2015). In

diesem Fall handelt es sich bei den zusätzlichen Informationen um den „*Energiestrom in die Umgebung*“. Damit lässt sich im nds. Kerncurriculum am Ende von Jahrgang 8 zwar noch keine explizite Nennung von Energieentwertung finden, dennoch ist der Energiestrom in die Umgebung Teil des Entwertungsprozesses. Die zur Entwertung gehörende Irreversibilität, die auch die Nutzbarkeit sowie die Wertigkeit von Energie miteinschließt und zur umfänglichen Begriffsbildung erforderlich ist, soll erst am Ende von Jahrgang 10 erworben werden (Kultusministerkonferenz, 2015).

Bundesländer wie Rheinland-Pfalz (RP), Thüringen (TH), Bayern (BY), Baden-Württemberg (BW), Saarland (SL), Sachsen-Anhalt (ST) und Hamburg (HH) erwähnen Energieerhaltung in ihren Lehrplänen für das Gymnasium im Fach Physik ebenfalls bereits im Anfangsunterricht in den Jahrgangstufen 7 bzw. 8¹². Demgegenüber wird in diesen Jahrgangstufen vom Aspekt Energieentwertung in den Lehrplänen von HH, SL, BW, und RP nur implizit bei mechanischen Vorgängen über die Umwandlung von Energie in thermische Energie oder den Energiestrom in die Umgebung gesprochen. Explizit findet sich eine Nennung des Begriffs Entwertung in den erwähnten Bundesländern erst in höheren Jahrgängen (Baden-Württemberg Ministerium für Kultur, Jugend und Sport, 2016; Freie Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung, 2011; Ministerium für Bildung und Kultur Saarland, 2013; Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, Rheinland-Pfalz, 2014). In den Ländern NRW, TH, BY und ST erfolgt keine implizite Nennung im beschriebenen Sinne, hier ist vereinzelt vom Wirkungsgrad oder dem Nutzen der Energie für den weiteren Umwandlungsprozess die Rede (Ministerium für Bildung Sachsen-Anhalt, 2016; Ministerium für Schule und Weiterbildung, NRW, 2008; Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung Bayern, 2004; Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, 2012; vgl. Übersicht im Anhang E).

Sowohl in den landesweiten Bildungsstandards als auch in den Lehrplänen der Länder finden sich die Aspekte der Energiequadriga wieder. In vielen Bundesländern ist in der Konkretisierung der Länderlehrpläne das Prinzip der **Energieerhaltung bereits im Anfangsunterricht** durch explizite Nennung **gefordert**. Demgegenüber ist das Konzept der **Energieentwertung** zumeist nur teilweise durch **implizite Umschreibungen wie den Energiestrom in die Umgebung** oder die Energieumwandlung in thermische bzw. innere Energie erwähnt.

¹² Hier ist zu bedenken, dass einige Bundesländer mit der weiterführenden Schule erst in der 7. Klasse beginnen oder in den Klassen 5 und 6 naturwissenschaftlichen Unterricht erteilen.

2.4 Herausforderungen beim Lernen des Energiekonzepts

Der zentralen Bedeutung des Energiekonzepts für Gesellschaft und Naturwissenschaft stehen Schwierigkeiten beim Lehren und Lernen des komplexen Energiekonzepts entgegen. Bereits in den Anfängen der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Energiebegriff führte dieser auch bei Physikerinnen und Physikern zu Verwirrungen und Fehlinterpretationen (Boyes & Stainisstreet, 1990). Dies liegt unter anderem darin begründet, dass der Begriff Energie, aber auch Wärme, Temperatur und Arbeit, sowohl im Alltag als auch in der naturwissenschaftlichen Fachsprache verwendet werden. Jedoch unterscheiden sich der Alltagssprachgebrauch und die fachsprachliche Verwendung der Begriffe in einer Weise, die ein Hindernis beim Lernen der fachlichen Bedeutung von Energie darstellen kann (Driver & Warrington, 1985; Nordine, 2016). Bei der Entwicklung eines Lehrgangs zur Einführung des Energiekonzepts müssen demnach die Vorstellungen zum Energiekonzept sowie zu den korrespondierenden Größen Temperatur und Wärme berücksichtigt werden und Anknüpfungspunkte bilden.

In den letzten vierzig Jahren wurden im Rahmen fachdidaktischer Forschung die Vorstellungen zum Energiekonzept sowie zur Temperatur und Wärme erhoben und zum Teil neu evaluiert (vgl. Behle & Wilhelm, 2017; Crossley, Hirn & Starauschek, 2009; Duit, 1995; Watts, 1983). Im Folgenden werden die für die Sekundarstufe I relevanten Vorstellungen und das Verständnis von Energie, Temperatur und Wärme von Lernenden zusammengefasst.

2.4.1 Schülervorstellungen

Schülerinnen und Schüler verfügen bereits vor dem Physikunterricht über bestimmte Vorstellungen zu Unterrichtsinhalten, die tief verankert sind und zum Teil im Widerspruch zur fachlichen Sichtweise stehen (Duit, 1995). Diese Vorstellungen können im Unterricht dem Aufbau von Wissen im Wege stehen, da neue Inhalte vor dem Hintergrund dieser Vorstellungen bewertet werden (ebd.). *„Der Unterricht muß also an den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler anknüpfen [...] und darüber hinaus für die wissenschaftliche Sicht werben, d. h. die Schüler davon überzeugen, daß diese Sicht fruchtbare neue Einsichten bietet.“* (Duit, 1995, S. 11). Dabei reicht es häufig nicht aus, wenn die Schülerinnen und Schüler die Unterrichtsinhalte verstehen, sie müssen auch von diesen überzeugt sein (ebd.).

2.4.1.1 Energievorstellungen

In den achtziger Jahren wurde Energie von Schülerinnen und Schülern im Rahmen von Assoziations-tests noch vorwiegend mit einer Art Treibstoff verbunden, der aus bestimmten Quellen wie Öl, Benzin oder Kohle gewonnen wird (Duit, 1986b; Watts, 1983). Während die Assoziationen mit elektrischem Strom noch weniger ausgeprägt waren, zeigt sich in einer erneuten Erhebung von Crossley und Starauschek (2010) rund 25 Jahre später ein anderes Bild: Die Assoziation mit elektrischem Strom hat deutlich an Bedeutung gewonnen und auch die Nennung von physikalischen Termini, insbesondere der Energieformen, tritt vermehrt auf. Dies konnte in der Studie von Behle und Wilhelm (2017) bestätigt werden.

Neben den Assoziations-tests wurden ebenfalls qualitative Untersuchungen der Tiefenstruktur durchgeführt, die Hinweise auf die Rahmenkonzepte, d. h. die Erklärungs- und Gedankenmuster von Schülerinnen und Schülern, zum Energiekonzept liefern (Behle & Wilhelm, 2017; Watts, 1983). Watts (1983) identifizierte in diesem Rahmen verschiedene Sichtweisen: Neben der anthropozentrischen Sichtweise, bei der Energie vorwiegend Lebewesen zugeordnet wird, lassen sich Beschreibungen kategorisieren, in der Energie als Aktivität verstanden wird, die in Vorgängen vorhanden ist (ebd.).

Weiterhin wird Energie eine Funktion für das moderne Leben zugeschrieben, sie fungiert als eine Art Luxusartikel, der das Leben angenehmer macht (Duit, 1995). Ebenfalls lassen sich Gedankenmuster finden, in denen Energie zum einen bei einem Vorgang entsteht bzw. produziert wird und zum anderen als eine Art Zutat oder Inhaltsstoff verstanden, der in Dingen gelagert ist und ausgelöst werden kann. Daran schließt die Vorstellung an, dass diese gelagerte Energie verbraucht werden kann. Während der Energieverbrauch die weitverbreitetste Vorstellung bei Schülerinnen und Schülern in verschiedenen Altersstufen ist (Kesidou & Duit, 1993), lassen sich durchaus auch anschlussfähige Vorstellungen wie der Energietransfer finden. Hier wird Energie verschiedenen Erscheinungsformen zugeordnet, die ineinander umgewandelt und zwischen Systemen hin- und hertransferiert werden kann (Behle & Wilhelm, 2017; Watts, 1983). Behle und Wilhelm (2017) erkannten ebenfalls ein Muster, bei dem die Erscheinungsformen und teilweise die Umwandlung von Energie beschrieben werden, jedoch ist der Transfer hier kein durchgängiger „Fluss“. Vielmehr wird die Energieübertragung durch einen Verbrauch einer Energie(-form) beschrieben, die zur Herstellung einer anderen Energieform verwendet wird. Dieses Erklärungsmuster wird von Behle und Wilhelm (2017) partiell transferierte Energie genannt.

2.4.1.2 Vorstellungen und Verständnis von Temperatur und Wärme

Wärme und Temperatur werden in den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler häufig entgegen ihrer fachlichen Definition nicht voneinander abgegrenzt, wobei Wärme eher mit höheren Temperaturen in Verbindung gebracht wird (Duit, 1995). Temperatur wird dabei als Maß oder die Menge der Wärme betrachtet (Kesidou & Duit, 1993; Millar, 2014). Ebenso wird Wärme häufig als eine Art Substanz beschrieben, die in oder aus Objekten fließen kann und durch die Ansammlung zur Temperaturänderung führt (Erickson, 1979). In der Primarstufe lässt sich beobachten, dass Schülerinnen und Schüler Wärme qualitativ bzw. halb-quantitativ (je-desto-Beziehungen) mit ihrer Wirkung verknüpfen und teilweise auch mechanischen Vorgängen wie Reibung diese Wirkung zusprechen (Duit, 1995).

Kesidou und Duit (1993) stellten im Rahmen ihrer Studie fest, dass Schülerinnen und Schüler innerhalb der Sekundarstufe I nicht oder kaum eine Abgrenzung zwischen der Zustandsgröße Temperatur und der Prozessgröße Wärme entwickeln¹³. Beispielsweise wird das Erhitzen oder Abkühlen nicht als Interaktion zwischen zwei Objekten unterschiedlicher Temperatur gesehen: Beim Abkühlen einer Tasse Tee wird die Umgebungsluft als Wechselwirkungspartner nicht in Betracht gezogen, sondern dieses eher als natürlicher Vorgang betrachtet (Duit, 1995). Weiterhin lassen sich verbreitet Vorstellungen finden, in denen der Temperatenausgleich zwischen zwei Objekten vom Material abhängt. Das bekannteste Phänomen ist hierbei, dass sich bei gleicher Temperatur Metalle bei Berührung kälter anfühlen als andere Materialien wie zum Beispiel Holz (Duit, 1995; Erickson, 1979; Xie, 2012b). Haglund, Jeppsson, Hedberg und Schönborn (2015) schreiben diese Schwierigkeiten der Überzeugung zu, dass der Berührungssinn die Funktion eines Thermometers übernimmt und nicht als Sinn dafür gesehen wird, wie schnell Materialien Wärme weiterleiten (vgl. u. a. Clough & Driver, 1985; Duit, 1995). Stabile Konzeptualisierungen bzw. Modelle zum Wärmetransport werden eher selten entwickelt, „warm oder kalt sein“ wird auch bei älteren Schülerinnen und Schülern häufig als Eigenschaft des Materials gesehen (Clough & Driver, 1985; Duit, 1995). Beispielsweise wird einem Pullover

¹³ In vielen Standardwerken wie dem Halliday Physik (2005) oder dem Gerthsen Physik (2002) lässt sich keine einheitliche Verwendung des Begriffs Wärme finden. Es wird hier im Zusammenhang mit Wärme auch von Wärmeenergie gesprochen. Im Tipler Physik (2015) wird Wärmeenergie teilweise auch synonym für innere Energie verwendet. Um die Konzepte Wärme und innere Energie voneinander abzugrenzen, sollte der Begriff Wärmeenergie im Unterricht nicht genutzt werden (Duit, 1986b), weshalb in der vorliegenden Arbeit ausschließlich von Wärme und innerer Energie gesprochen wird, auch in Anlehnung an das niedersächsische Curriculum im Fach Physik.

Wärme zugesprochen sowie die Fähigkeit, diese Wärme auf Objekte wie Eiswürfel zu übertragen (Duit, 1995).

Ein weit verbreitetes Modell zur Veranschaulichung der Vorgänge bei der Wärmeleitung stellt in der Schule das Teilchenmodell dar, welches für die Sekundarstufe I durch die Grundgedanken der kinetischen Gastheorie geprägt ist (Fischler & Lichtfeldt, 2004). Jedoch erwerben Schülerinnen und Schüler in der Regel kein angemessenes Verständnis des Teilchenmodells. Häufig ordnen Lernende den Teilchen Eigenschaften der makroskopischen Welt wie z.B. Farbe oder Temperatur zu (Duit, 1992, 1995; Fischler & Lichtfeldt, 2004; Haglund, Jeppsson et al., 2015). Ebenfalls erwarten Schülerinnen und Schüler eine naturgemäße Abnahme der Teilchenbewegung, die mit Alltagsbeobachtungen korrespondiert (Fischler & Lichtfeldt, 2004). Wird Schülerinnen und Schülern das Modell jedoch zur Erklärung von Phänomenen wie Konduktion angeboten, wird es von einer Vielzahl akzeptiert und kann gerade am Ende der Sekundarstufe I zum Problemlösen herangezogen werden (Duit, 1995). Daher kann die explizite Einführung von molekularen Modellen einen vielversprechenden Weg bieten, die Konzeptualisierungen, die der Wärmeleitung zugrunde liegen, zu entwickeln (Haglund, Jeppsson et al., 2015).

2.4.2 Identifizierte Lernschwierigkeiten

Während ein grundlegendes Verständnis der Aspekte *Energieformen*, *Energieumwandlung* und *Energieübertragung* oft schon bei jüngeren Schülerinnen und Schülern vorliegt, ist die Verständniserweiterung für *Energieerhaltung* und *Energieerhaltung* mit großen Schwierigkeiten verbunden (Weßnigk, 2018): Jenelten-Allkofer und Duit (1980) konnten bei jüngeren Schülerinnen und Schülern eine Auffassung für Mengenhaftigkeit von Energie(-formen) feststellen, wobei sich dieses Verständnis mit zunehmendem Alter weiterentwickelte (ebd., vgl. auch Boyes & Stainisstreet, 1990; K. Neumann et al., 2010; Viering, 2012). In der Primarstufe und Sekundarstufe I sind bei Lernenden bereits tragfähige Anknüpfungspunkte für die Aspekte Energieumwandlung und Transfer vorhanden: Sie beschreiben beispielsweise bei Vorgängen wie gekoppelten Pendeln eine Weitergabe von „Etwas“, das in unterschiedlicher Gestalt erscheint, allerdings wird nicht angenommen, dass bei der Weitergabe die Menge gleich bleibt (Duit, 1995; Rhöneck & Duit, 1978).

Es ist belegt, dass das Verständnis für die Aspekte Energieerhaltung und Energieerhaltung auch bei älteren Schülerinnen und Schülern begrenzt ist (Chabalengula et al., 2012; Daane, McKagan, Vokos & Scherr, 2015; Driver & Warrington, 1985; K. Neumann et al., 2010; Viering,

2012, für die Biologie: Opitz, Harms, Neumann, Kowalzik & Frank, 2015). Schülerinnen und Schüler können zwar häufig den Energieerhaltungssatz wiedergeben, diesen aber nur bedingt auf Alltagsphänomene übertragen oder zum Problemlösen heranziehen, auch wenn diesem im Unterricht große Aufmerksamkeit geschenkt wurde (Black & Solomon, 1983; Duit, 1995; Viering, 2012). Auch bei idealisierten Vorgängen (unter Annahme der Reibungsfreiheit) können viele Lernende den Erhaltungssatz nur in bestimmten Situationen zur korrekten Vorhersage nutzen und darüber hinaus nur selten Energie(-erhaltung) zur Argumentation heranziehen. Aber auch bei realistischeren Problemen, die mit Dissipation verbunden sind, kann nur selten auf dieses Konzept zurückgegriffen werden (Duit, 1995). K. Neumann (2018) berichtet, dass „*nur etwa ein Drittel aller Schülerinnen und Schüler [...] zum Ende der Schulzeit ein Verständnis von Energie [erreicht], das die Erhaltung mit einschließt*“ (S. 7).

Laut einer Studie von Kesidou und Duit (1993) verstehen einige Schülerinnen und Schüler am Ende von Sekundarstufe I zwar die Bedeutung des Erhaltungssatzes im Sinne des Erhalts einer Menge, erklären die Abnahme der Amplitude eines Pendels aber beispielweise mit der Ermüdung der Energie im Laufe des Prozesses. Weitaus häufiger ziehen sie jedoch die Idee des Energieverbrauchs zur Erklärung heran (ebd.). Dagegen kann eine der Argumentationen, die im Zusammenhang mit dem physikalischen Konzept der Energieentwertung zu sehen ist, nicht beobachtet werden. Auch wenn Lernende bei Vorgängen eine Temperaturerhöhung bemerkten, schlossen sie nicht auf eine Energieumwandlung oder einen Energietransfer, sondern brachten diese lediglich mit Reibung in Verbindung (Kesidou & Duit, 1993).

Solomon (1985) konnte in ihrer Studie eine Missinterpretation des Energieerhaltungssatzes hinsichtlich der Lokalisierung der Energie beobachten. Schülerinnen und Schüler ordneten die Energie am Ende von Vorgängen weiterhin dem Objekt zu: „[...] *the energy [...] [is] stored up in the system and even to be ready to be released again in the original form by some reversible process*“ (Solomon, 1985, S. 167). Diese Schülerinnen und Schüler interpretierten die Aussage des Erhaltungssatzes so, dass die Energie (z.B. als potenzielle Energie) im System bleiben muss (ebd.).

Daane et al. (2015) haben gezeigt, dass sowohl Schülerinnen und Schüler eines High-School Science Course wie auch Lehrpersonen das Prinzip der Energieerhaltung bei der Analyse mechanischer Szenarien nicht konsequent anwenden können. Sie stellten fest, dass bei Schülerinnen und Schülern sowie Lehrpersonen in Zusammenhang mit Szenarien Schwierigkeiten auftraten, in denen kinetische Energie in innere Energie umgewandelt wird (bspw., wenn eine

rollende Kugel zum Stillstand kommt). Die Befragten erwarteten eine bemerkbare Temperaturerhöhung und damit einen Indikator für die innere Energie zu erhalten, da sie ebenso die mit der kinetischen Energie verbundene Bewegung sehen konnten. Da die Temperaturerhöhung zu gering war, lehnten sie die Idee der Umwandlung von kinetischer Energie in innere Energie ab (ebd.). Daane et al. (2015) zogen daraus den Schluss, dass die Ursache der Schwierigkeiten offenbar in einer starken Verbindung zwischen Energieformen und ihren wahrnehmbaren Indikatoren liegt. Allerdings konnten die Schwierigkeiten von den Lehrpersonen überwunden werden, die die Beobachtungen in Zusammenhang mit „übertriebenen“ Szenarien wie dem Wiedereintritt eines Space-Shuttles in die Atmosphäre brachten, in denen eine spürbare Erwärmung stattfindet (ebd.).

Die fachdidaktische Forschung zeigt, dass die curriculare Forderung nach dem Aufbau eines grundlegenden Verständnisses für **Energieerhaltung** (bereits im Anfangsunterricht) nicht eingehalten werden kann. Die bei Lernenden vorherrschende Vorstellung ist der **Energieverbrauch**. Auch in höheren Jahrgangstufen können die Lernenden den Energieerhaltungssatz, häufig trotz eingehender Thematisierung im Energieunterricht, nur schwer auf Alltagsphänomene anwenden oder zum Problemlösen heranziehen.

Bei der Beschreibung von dissipativen Prozessen schließen Lernende nur selten auf einen Energietransfer in die Umgebung bzw. die Umwandlung in innere Energie, wobei als Ursache der Verständnisschwierigkeiten hier unter anderem der fehlende Indikator wie die Temperaturerhöhung genannt wird. Argumentationen, die mit dem Prinzip der **Energieentwertung** korrespondieren, **bleiben häufig aus**.

Demgegenüber kann ein grundlegendes Verständnis der Aspekte Energieformen, Energieumwandlung und Energietransfer oft schon bei jüngeren Schülerinnen und Schülern beobachtet werden.

2.5 Entwicklung des Energieverständnisses

Ausgehend von den bekannten Energievorstellungen und den Herausforderungen beim Lernen des Energiekonzepts in verschiedenen Altersstufen (vgl. Kapitel 2.4), haben Liu und McKeough (2005) auf Grundlage von Daten der TIMS-Studie von 1995 ein Modell entwickelt, das die Entwicklung des Energieverständnisses mit fortschreitendem Alter abbildet. Hierfür analysierten sie die Daten der TIMS-Studie auf nationaler Ebene für die USA und stellten einen Anstieg der Aufgabenschwierigkeit nach den folgenden hierarchischen Stufen fest, entlang derer sich das Energieverständnis angefangen von vorunterrichtlichen Alltagserfahrungen entwickelt: Aktivität und Arbeit, Energiequellen und -formen, Energietransfer, Energieentwertung und Energieerhaltung (Liu & McKeough, 2005).

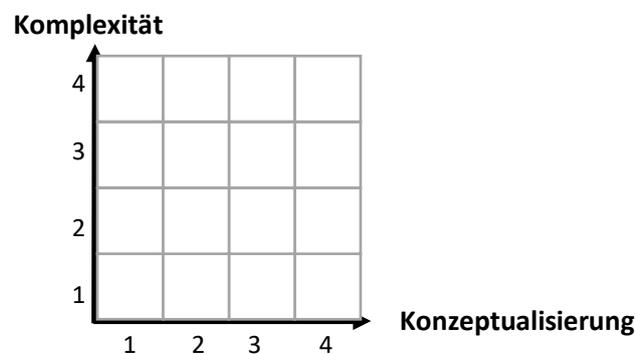


Abbildung 3: Kompetenzstufenentwicklungsmodell von Viering (2012): Konzeptualisierungen: (1) Quellen und Formen, (2) Umwandlung und Transfer, (3) Entwertung und (4) Erhaltung; Komplexität (1) Fakten, (2) Zuordnung, (3) Zusammenhänge, (4) Konzept.

Anknüpfend an diese Forschung entwickelten K. Neumann et al. (2013) ein zweidimensionales Kompetenzentwicklungsmodell¹⁴, welches neben der Konzeptualisierung die Dimension der Komplexität beinhaltet. Die untere Grenze der Dimension Konzeptualisierung bildet hier das niedrigste Level (1) Energieformen und -quellen, wobei eine hierarchische Entwicklung über (2) Energieumwandlung und -transfer, (3) Energieentwertung und (4) Energieerhaltung abgebildet wird. Die zweite Dimension stellt die anwachsende Komplexität der Wissensbasis dar, die durch das Vernetzen von Wissen im Rahmen der Verständnisentwicklung innerhalb der Konzepte stattfindet (K. Neumann et al., 2010; K. Neumann et al., 2013; Viering, 2012). Die Komplexitätsniveaus sind definiert durch das unterste Level (1) Fakten und wachsen in aufeinander aufbauender Rangfolge zu (2) Zuordnung, (3) Zusammenhänge und (4) Konzept an. Als obere Grenze definiert das Modell demnach ein voll entwickeltes Verständnis der genannten

¹⁴ Im Kapitel 2.5 wird der Terminus von K. Neumann et al. (2013) und Viering (2012) übernommen, die in diesem Zusammenhang den Begriff „Kompetenzen“ verwenden.

Aspekte (K. Neumann et al., 2013; vgl. Abbildung 3). Für den Aspekt Energieentwertung ist die fortschreitende Komplexität beispielweise definiert durch: (1) Kenntnis der Existenz der Energieentwertung, (2) Fähigkeit zur Benennung von Ursachen für Entwertung, (3) Fähigkeit Aussagen über die Nutzbarkeit einer Energieform zu treffen und Vermögen zur abstrakten Beschreibung des Entwertungsprozesses und (4) Fähigkeit zur Beschreibung des Mechanismus des Entwertungsprozesses *in einer bestimmten Situation* (Viering, 2012).

Die Untersuchung des Modells ergab korrespondierend zu den Ergebnissen von Liu und McKeough (2005) einen allgemeinen Kompetenzfortschritt über die angegebenen Konzeptlevel (K. Neumann et al., 2013; Viering, 2012). Es zeigten sich jedoch noch tiefere Einblicke: Nach K. Neumann et al. (2013) sind diese Ebenen nicht streng hierarchisch zu sehen, vielmehr können Schülerinnen und Schüler in verschiedenen Konzeptleveln auch parallel Verständnis entwickeln. Beispielweise verfügen Schülerinnen und Schüler, die ein Verständnis für einige wenige Energieformen entwickelt haben, aber noch über kein tiefergehendes Verständnis von Formen und Quellen verfügen, bereits über ein Verständnis für Energieumwandlung im höheren Konzeptlevel (ebd.). Ebenso konnte in dieser Studie gezeigt werden, dass eine Verständnisentwicklung für Energieentwertung, qualitativ im Sinne der Dissipation in Folge von Reibungsprozessen, parallel zu der konzeptuellen Entwicklung von Umwandlung und Transfer stattfindet (K. Neumann et al., 2013).

Während Liu und McKeough (2005) die Zunahme im Energieverständnis in Abhängigkeit zu der einer generellen kognitiven Reifung, d. h. der Entwicklung allgemeiner kognitiven Fähigkeiten wie beispielsweise der Lesefähigkeit der Schülerinnen und Schüler mit zunehmenden Alter sehen, schlussfolgern K. Neumann et al. (2013) aus ihren Ergebnissen ebenfalls einen Zusammenhang mit der fortschreitenden Beschulung. Weißnigk und Neumann (2015) konnten in einer Re-Analyse der Daten im Zusammenhang mit den allgemeinen kognitiven Fähigkeiten „Leseverstehen“, „Lesegeschwindigkeit“, „non-verbale, figurale Fähigkeiten“ und „quantitativ-nummerische, kognitive Fähigkeiten“ sowie der Schulstufe bzw. -note sowohl einen Einfluss der generellen kognitiven Reifung als auch einen Einfluss der schulischen Bildung nachweisen, wobei der Einfluss der schulischen Bildung als bedeutsamer gewertet wurde; die Wichtigkeit von Lehrgängen wird betont (Weißnigk & Neumann, 2015, vgl. auch Fortus, Sutherland Adams, Krajcik & Reiser, 2015). Insbesondere der Gestaltung von Unterrichtslehrgängen wird eine große Bedeutung für die Verständnisentwicklung im Hinblick auf das abstrakte

Energiekonzept zugeschrieben. Daher stellt die Entwicklung von geeigneten kompetenzfördernden Lehrgängen ein Ziel fachdidaktischer Forschung dar (Weßnigk & Nordine, 2017).

K. Neumann et al. (2013) folgern daher aus ihren Ergebnissen als Empfehlung für zukünftige Lehrgänge des Anfangsunterrichts Energie:

[...] initial teaching should focus on developing an understanding of energy with respect to forms and sources first. Then, the concept of transfer and transformation should be covered, before introducing energy dissipation and conservation. [...] [W]e suggest that it is not wise for all possible forms (and sources) of energy to be covered in the curriculum before the concept of energy transfer and transformation is introduced. Instead we suggest to ensure that students obtain a thorough understanding (1) of what an energy form is and (2) that different energy forms exist—before moving on to the transformation of one energy form into the other. (S. 184-185)

Die Kompetenzentwicklung innerhalb des Energiekonzepts kann durch ein Modell beschrieben werden, das eine Entwicklung der Konzeptualisierungen, angefangen bei Energieformen über Energieumwandlung, Transfer und Entwertung bis hin zur Energieerhaltung, annimmt. Dabei ist die Entwicklung nicht als streng hierarchisch zu sehen, vielmehr kann sich in den verschiedenen Konzeptleveln parallel Verständnis entwickeln.

Einen bedeutsamen Einfluss auf die Kompetenzentwicklung im Energiekonzept hat die schulische Bildung, woraus sich eine **Notwendigkeit der Entwicklung von konzeptförderlichen Lehrgängen** ableiten lässt.

2.6 Das didaktische Konzept: *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*

Fachdidaktische Forschung hat gezeigt, dass sowohl das vorunterrichtliche Energieverständnis als auch das Verständnis nach der Beschulung hauptsächlich den lebensweltlichen Gebrauch von Energie widerspiegelt (Duit, 2014; vgl. Kapitel 2.4): „*Wenn ich Früchte esse, bekomme ich Energie und wenn ich Sport treibe, verbrauche ich Energie*“¹⁵. Diese Aussage einer Schülerin der 7. Jahrgangsstufe zu Beginn des Energieunterrichts im Fach Physik verdeutlicht, dass das Verständnis von Energie durch den im Alltag dominierenden Sprachgebrauch des Energieverbrauchs geprägt ist (Duit, 2014; Nordine, 2016). Problematisch ist dabei jedoch, dass sich der Alltagssprachgebrauch und die fachsprachliche Verwendung des Begriffs Energie in einer Weise unterscheiden, die ein Hindernis beim Lernen der fachlichen Bedeutung von Energie darstellen kann (Nordine, 2016). Die aus fachlicher Sicht wohl am bedeutendste Eigenschaft von Energie, die Energieerhaltung, kommt im Alltag nicht vor (Schlichting, 2000): Jeder rollende Ball stoppt nach wenigen Metern scheinbar von allein und um beim Fahrradfahren auf gerader Strecke die Geschwindigkeit zu halten, muss in die Pedale getreten werden. Bei diesen von Verbrauch geprägten Erfahrungen ist die Energieerhaltung nur schwer erkennbar. Der scheinbare Widerspruch zwischen Alltagserfahrungen und der physikalischen Sichtweise wird häufig als Ursache der Verständnisschwierigkeiten im Bereich der Energieerhaltung gesehen (Duit, 2014; Schlichting, 2000). Traditionelle Unterrichtskonzepte fokussieren häufig den Aspekt der Energieerhaltung im Rahmen idealisierter Systeme, die die lebensweltlichen Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler nicht abbilden (Millar, 2014; Nordine, 2016). „*Diese Vernachlässigung, ja die bewusste Unterdrückung [...] [der Verbrauchserfahrungen] verhindert geradezu, dass Beziehungen zwischen physikalischen Konzepten und lebensweltlichen Erfahrungen gesehen werden*“ (Schlichting, 2000, S. 2). Vielmehr sollte an diese Vorstellungen und Erfahrungen im Unterricht angeknüpft und diese hervorgehoben werden (Duit, 1995; Millar, 2014; Schlichting & Backhaus, 1987). Denn wird unter Verbrauch die qualitative Veränderung der Energie verstanden, die mit einem Wertverlust verbunden ist, steht diese nicht im Widerspruch zum Mengenerhalt¹⁶. Fachdidaktisch wird diese Veränderung der Energie durch Energieentwertung beschrieben.

¹⁵ Die Schülerinnen und Schüler wurden zu Beginn des Lehrgangs gebeten Sätze zu formulieren, in denen sie den Begriff Energie verwenden. Dieses Zitat stammt von einer Schülerin (13 J.) der 7. Jahrgangsstufe eines nds. Gymnasiums.

¹⁶ Diese Vorstellung korrespondiert ebenfalls mit lebensweltlichen Erfahrungen wie dem Wasserverbrauch beim Geschirrspülen, bei dem die Wasserqualität zwar abnimmt, die Menge aber unverändert bleibt. Für ein erneutes Geschirrspülen ist dieses veränderte Wasser jedoch wertlos (Schlichting, 2000).

Um bei Alltagsphänomenen das *Erhaltungsprinzip erfassen zu können*, scheint es für Lernende hilfreich, wenn gleichermaßen die dabei stattfindende **Energieentwertung beobachtbar** wird (Duit, 2014; Millar, 2014).

Ein Unterrichtskonzept, das diese scheinbaren Widersprüche adressiert, sollte neben dem Gedanken der Energieerhaltung ebenfalls Energieentwertung thematisieren und den ergänzenden Charakter der beiden Konzepte hervorheben (Schlichting & Backhaus, 1987). Dies kann beispielsweise geschehen, indem bei einer Vielzahl an unterschiedlichen Vorgängen der **Fokus auf** den dabei stattfindenden **Energietransfer** in die Umgebung gelegt wird.

Bei jedem Energieumwandlungs- oder Übertragungsprozess wird ein Teil der Energie an die Umgebung übertragen und dort weitertransportiert, was zu einer Temperaturerhöhung der Reibungspartner und der Umgebung führt.

Dieser Fokus auf dem Energietransfer bei dissipativen Prozessen ermöglicht es Lernenden, den Mengenerhalt zu erkennen und den damit verbundenen Wertverlust für den Vorgang zu begreifen (Solomon, 1985). Zudem schließt diese Betrachtung an das für Schülerinnen und Schüler besser verständliche Konzept des *Energietransfers* an (Behle & Wilhelm, 2017; K. Neumann et al., 2010). Solomon (1985) empfiehlt, um Missverständnisse bei der Deutung des Erhaltungssatzes zu vermeiden, das Konzept der Energieentwertung *vor* der Energieerhaltung einzuführen und bei der Formulierung des Erhaltungssatzes den Mengenerhalt in den Vordergrund zu stellen¹⁷, was mit dem didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* korrespondiert.

Jedoch bleibt bei dissipativen Prozessen der Energietransfer bzw. die damit verbundene Temperaturerhöhung Lernenden häufig verborgen, da diese zu gering ist, um sie wahrnehmen oder mit traditionellen Thermometern messen zu können. Das Fehlen eines Indikators für die innere Energie und somit für den Energietransfer kann die Konzeptualisierung von Energieentwertung behindern (Daane et al., 2015; vgl. Kapitel 2.4.2).

Mit Hilfe von IR-Kameras kann die Temperatur als ein Indikator für innere Energie direkt beobachtet werden und somit als Evidenz für Energietransfer dienen. Im folgenden Kapitel werden daher IR-Kameras näher beleuchtet.

¹⁷ Die Formulierung „Energie kann nicht erzeugt oder zerstört werden“ kann zu Missverständnissen bei der Lokalisierung der Energie führen (Solomon, 1985; vgl. Kapitel 2.4.2).

3 Infrarotkamera

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte. Nach Schnotz (2014) gehören Bilder zu den depiktiven, externen Repräsentationen, denen in der Literatur verschiedene Eigenschaften zugewiesen werden; unter anderem erfüllen sie den Zweck der Verständigung und haben einen „Evidenzcharakter“ (Müller, 2003; Wagner, 2010). Das Verstehen von Bildern ist ein aktiver Informationsverarbeitungsprozess, der zum Aufbau einer internen Repräsentation bzw. einem internen, mentalen Modell¹⁸ führt (Höpel, 2008). Ziel des Einsatzes von Bildern kann das Kommunizieren von abstrakten oder auch konkreten Aussagen sein, wobei diese dabei helfen sollen, komplexe Zusammenhänge zu strukturieren und damit den betreffenden Inhalt (besser) verstehen zu können (Vollmer & Möllmann, 2010a, S. 2).

Aus diesem Grund gibt es in der Forschung und Lehre eine Vielzahl von Techniken, Messdaten und Auswertungen in Form von Diagrammen oder Bildern darzustellen (Vollmer & Möllmann, 2010a). Ein solches Gerät ist die IR-Kamera¹⁹; mit ihr lassen sich thermische Phänomene und Prozesse visualisieren, die ohne die besondere Funktionalität der IR-Kamera nicht beobachtbar wären, da sie für das menschliche Auge unsichtbar sind.

Die Einsatzgebiete von IR-Kameras sind vielfältig, wobei eines der bekanntesten die Gebäudetechnik darstellt. Hier wird die IR-Kamera genutzt, um beispielsweise zugemauerte Fenster oder verputztes Fachwerk zu erkennen, die durch eine rein optische Betrachtung nicht wahrnehmbar wären. Ebenfalls werden IR-Kameras im Rahmen von Energieberatung eingesetzt, um Wärmebrücken zu identifizieren und Auskunft über „thermische Schwachstellen“ zu geben (Vollmer & Möllmann, 2010b). Mit Hilfe der Messung der Oberflächentemperatur können Lecks in Rohrleitungen oder der Verlauf von verborgenen stromführenden Leitungen identifiziert werden (Karstädt, Möllmann, Pinno & Vollmer, 1998).

Ein Vorteil der Infrarotthermographie ist die berührungsfreie und damit auch zerstörungsfreie Messung (Möllmann & Vollmer, 2000). Daher werden IR-Kameras sowohl während der

¹⁸ Mentale Modelle sind interne Wissensrepräsentationen, in denen Personen komplexes Wissen speichern (Kollar, 2012). Im Folgenden wird auf die Verarbeitungsprozesse in mentalen Modellen nicht näher eingegangen, da dies nicht Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist.

¹⁹ Neben der Bezeichnung Infrarotkamera oder kurz IR-Kamera haben sich für die bildgebenden Verfahren auf Grundlage der Messung von Strahlung im Infrarotbereich ebenfalls die Begriffe Wärmebildkamera bzw. Thermographie etabliert, welche die Visualisierung thermischer Phänomene betonen. Die besondere Funktion der thermischen Bildgebung wird im Englischen durch die Bezeichnung „thermal imaging“ herausgestellt. Möllmann und Vollmer (2000) beurteilen die deutschen Begriffe Wärmebildkamera bzw. Thermographie jedoch aus didaktischer Sicht als „unglücklich“ und sprechen sich daher für den Begriff Infrarotkamera aus (S. 65). In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Infrarotkamera (IR-Kamera) verwendet.

Fertigung als auch bei der Endkontrolle des Bauteils zur Qualitätskontrolle von Bauteilen verwendet. Auch in der Medizin ist die berührungsfreie Untersuchung des menschlichen Körpers mit Hilfe einer IR-Kamera ein nicht-invasives und damit schonendes Diagnosewerkzeug. Mit ihrer Hilfe lassen sich Regionen im Körper mit erhöhter bzw. geschwächter Durchblutung identifizieren, die auf Entzündungen, Thrombosen, krankhaftes Gewebe, Muskel- oder Nervenverletzungen hindeuten können. Damit stellt die Thermographie zum Beispiel im Bereich der Brustkrebsfrüherkennung gegenüber der Mammographie, bei der Röntgenstrahlung eingesetzt wird, ein ergänzendes Diagnoseverfahren dar (Müllges, 2000).

Zusammengefasst wird die IR-Kamera in Technik und Forschung genutzt, um Informationen über die Temperaturtopografie von Objekten zu erhalten oder Wirkungszusammenhänge durch hervorgerufene Temperaturerhöhung zu untersuchen.

Neben dem Einsatzbereich in Technik und Forschung hat die IR-Kamera mittlerweile auch Einzug in Museen, Ausstellungen oder Science Center gehalten. In diesen außerschulischen, durch informelles Lernen geprägten Lernorten, erfüllen die Bilder der IR-Kamera sowohl motivationale als auch kognitive Funktionen; sie sollen Interesse wecken, Emotionen auslösen aber auch Erkenntnisse über den Beobachtungsgegenstand ermöglichen (zu den Funktionen von Bildern vgl. Wagner, 2010). Mit dem Ziel der Kommunikation von Wissen werden IR-Kameras auch vermehrt in der Hochschullehre eingesetzt.

Aber auch in der Schule²⁰ können IR-Kameras als erweitertes Auge in allen Kontexten eingesetzt werden, in denen das Sichtbarmachen von thermischen Prozessen zum Erkenntnisgewinn beitragen kann. Beispielweise lässt sich bei dissipativen Prozessen eine Temperaturerhöhung beobachten, die als Indikator für die Umwandlung von Energie in innere Energie bei Energieentwertungsprozessen interpretiert werden kann. Im Rahmen fachdidaktischer Forschung lassen sich zahlreiche Experimente finden, die speziell mit dem Ziel der Visualisierung von thermischen Prozessen entwickelt und für den Einsatz in der Lehre vorgeschlagen wurden (z.B. Short, 2012; Vollmer, Möllmann, Pinno & Karstädt, 2001; Xie & Hazzard, 2011). In diesem Zusammenhang wird von der IR-Kamera als erweitertes Auge gesprochen, mit der unsichtbare Vorgänge sichtbar gemacht werden können und für den neuen, bildhaften und damit intuitiven Zugang geworben (Nordmeier, Strahl, Kirstein & Müller, 2008): „*Durch die Darstellung der*

²⁰ In einigen Schulbüchern wie z.B. „Fokus Physik“ für den Schuljahrgang 7-10, oder „Universum“ für den Schuljahrgang 7/8 ist im Zusammenhang mit Energieentwertung ein IR-Bild dargestellt, welches eine Häuserfassade mit Fenstern zeigt (Boysen et al., 2015; Carmesin, Kahle, Konrad, Trumme und Witte, 2016).

Messergebnisse als zweidimensionale Grafik [werden Prozesse wie Wärmeleitung] für Schülerinnen und Schüler zugänglicher. Sie können Messwerte einfacher auffassen und interpretieren, sodass die Gefahr von Fehlvorstellungen verringert wird“ (Kleefeld & Bohrmann-Linde, 2019, S. 209).

Dies verdeutlicht die besonderen Erwartungen, die an den Einsatz von IR-Kameras in Lehr-Lern-Prozessen geknüpft sind; ihnen wird eine lernförderliche Wirkung zugesprochen. Jedoch sind nur wenige empirische Untersuchungen über die Auswirkungen eines Einsatzes von IR-Kameras bzw. IR-Bildmaterial innerhalb von Lehr-Lern-Prozessen bekannt und die tatsächliche Lernförderlichkeit bleibt zu prüfen. In der pädagogischen Praxis besteht oft die Gefahr, dass Bilder „zu leicht“ genommen werden, unter der Annahme sie „sprächen für sich“ (Weidenmann, 2007, S. 151). Dies spiegelt sich ebenfalls in dem obigen Zitat wider, in dem von einer Erleichterung des Auffassens von Informationen durch das IR-Bild gesprochen wird.

Die Bildforschung zeigt, dass die gewünschte Wirkung von Bildern häufig verfehlt wird und die Informationen, die die Bilder kommunizieren sollen, nur teilweise verarbeitet und unzureichend oder falsch erfasst werden. Dies hängt auch wesentlich von der Komplexität der Bilder ab (Weidenmann, 2007).

Das Aufnehmen und Verstehen von IR-Bildern scheint auf den ersten Blick zunächst einfach (Kleefeld & Bohrmann-Linde, 2019; Nordmeier et al., 2008), ist aber vor dem Hintergrund des Emissionsgrades der Oberflächen und anderen Einflussfaktoren wie beispielsweise thermischen Reflexionen mit Schwierigkeiten verbunden. Diese im Bild enthaltenen komplexen Informationen können zur Überforderung des Betrachters führen: *„Wenn ein Bild mehr sagen kann als tausend Worte, kann es damit aber auch Verwirrung stiften“* (Girwidz, 2009, S. 219). Daher ist nach Vollmer und Möllmann (2010a) für eine korrekte Interpretationsleistung eine Schulung im Umgang mit IR-Bildern notwendig.

Doch auch wenn eine korrekte Interpretation der IR-Bilder in Bezug auf die Temperaturverteilung gelingt, muss in einem nächsten Schritt eine gedankliche Verknüpfung dieser Informationen mit dem beobachteten Phänomen oder Experiment gelingen. Für den Einsatz der IR-Kamera innerhalb eines Lehrgangs, der das Verständnis für Energieentwertung fördern soll, bedeutet dies, dass im Lernprozess eine Bedeutungszuweisung des IR-Bildmaterials als Evidenz für Energieentwertung stattfinden muss.

Im Folgenden wird nach der Betrachtung der theoretischen Grundlagen die IR-Kamera als digitales Messinstrument eingeführt, bevor mögliche Einflussfaktoren auf die detektierte

Signalgröße erörtert werden. Im Rahmen der Betrachtung der IR-Kamera als erweitertes Auge wird ein Modell zum Bilderverstehen vorgestellt.

Auf Grundlage bekannter Schülervorstellungen wird das Potenzial des Einsatzes von IR-Kameras in Lehr-Lern-Prozessen aus mediendidaktischer Sicht sowie aus Perspektive des Physikunterrichts beleuchtet und abschließend der Einsatz im Rahmen des didaktischen Konzeptes *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* vorgestellt.

3.1 Physikalische Grundlagen

Jeder Körper emittiert aufgrund der temperaturabhängigen Schwingungen auf atomarer Ebene elektromagnetische Strahlung, die thermische Strahlung oder auch Wärmestrahlung genannt wird. Dabei wird der Wellenlängenbereich von 780nm bis 1mm als Infrarotstrahlung bezeichnet. Vom gesamten Spektrum elektromagnetischer Strahlung ist für das menschliche Auge nur ein kleiner Ausschnitt im Wellenlängenbereich von 380nm bis 760nm sichtbar, die langwelligere IR-Strahlung ist für das menschliche Auge unsichtbar.

Max Planck hat 1900 ausgehend von idealisierten Oberflächen, sogenannten schwarzen Strahlern, das Planck'sche Strahlungsgesetz formuliert, welches die Emission elektromagnetischer Strahlung in Abhängigkeit von der Temperatur beschreibt (Hollandt, 2009). Wichtige Eigenschaften von schwarzen Strahlern sind, dass diese Strahlung unabhängig von der Wellenlänge vollständig absorbieren, für die jeweilige Temperatur die abgegebene Strahlungsleistung maximal ist und die spektrale spezifische Ausstrahlung nur von der Wellenlänge und Temperatur abhängt, nicht aber von der Richtung (Vollmer & Möllmann, 2010a). Eine experimentelle Annäherung an die Planck'sche Strahlung ist die Hohlraumstrahlung. Dabei tritt durch eine kleine Öffnung eines geheizten Hohlraumes nur wenig Strahlung ein und aus. Die Wände des Hohlraums werden auf konstanter Temperatur gehalten und stehen im thermischen Gleichgewicht mit der Strahlung im Inneren des Hohlraums, d. h. es wird genauso viel Energie aufgenommen wie abgegeben²¹ (Meschede, 2002).

Die Spektrometrie der Strahlung ergibt ein kontinuierliches, temperaturabhängiges Spektrum, wobei sich das Maximum der Strahlungsleistung bei Erhöhung der Temperatur zu kleineren Wellenlängen verschiebt (Möllmann & Vollmer, 2007). Mithilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes kann die Wellenlänge, bei der die Strahlungsleistung maximal ist, bestimmt

²¹ Es handelt sich um eine Näherung, da es bei Hohlraumstrahlern immer einen Anteil der Strahlung gibt, der nicht absorbiert, sondern reflektiert wird.

werden. Selbst für glühendes Metall wie Glühdraht liegt jedoch der Großteil der emittierten Strahlung im für das menschliche Auge unsichtbaren, infraroten Spektralbereich und nur ein Bruchteil im sichtbaren Spektralbereich (Meschede, 2002). Bei Temperaturen bis ca. 900K erstrecken sich die Wellenlängen von $0,8\mu\text{m}$ bis $1000\mu\text{m}$, was dem Infrarotbereich entspricht. Damit senden auch Gegenstände bei Umgebungstemperatur (ca. 300K) unsichtbare Infrarotstrahlung aus.

Die emittierte Strahlungsleistung hängt beim realen Strahler jedoch nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Emissionsgrad des Strahlers ab, welcher als Faktor im Strahlungsgesetz berücksichtigt wird (Möllmann & Vollmer, 2000). Bei einer gegebenen Temperatur ist der Emissionsgrad ε eines idealen schwarzen Strahlers definiert als $\varepsilon = 1$.

Bei realen Körpern ist die Strahlungsleistung geringer als bei den idealen schwarzen Strahlern. Es wird zwischen grauen und selektiven Strahlern unterschieden. Während sich die Ausstrahlung von grauen Strahlern im Vergleich ebenfalls über den gesamten Wellenlängenbereich erstreckt, zeichnen sich selektive Strahler durch eine unregelmäßige Verteilung der Ausstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge aus (Ebersbach, 2004). Auch bei realen Strahlern hängt die Strahlungsleistung von der Temperatur ab. Um also die Abstrahlung von realen Körpern beschreiben zu können, ist die Beachtung des jeweiligen Emissionsgrads notwendig, der die Abstrahlung ins Verhältnis zur Abstrahlung eines idealen, schwarzen Körpers der gleichen Temperatur setzt. Er kann einen Wert $0 < \varepsilon < 1$ annehmen und hängt neben der Temperatur ebenfalls von der Wellenlänge, dem Beobachtungswinkel, der Materialzusammensetzung und der Oberflächenbeschaffenheit des Strahlers ab (Möllmann & Vollmer, 2000).

Alle Körper senden aufgrund temperaturabhängiger atomarer Schwingungen elektromagnetische Strahlung aus, wobei Wellenlängen zwischen 780nm bis 1mm als Infrarotstrahlung bezeichnet werden. **Diese Strahlung ist für das menschliche Auge unsichtbar.** Neben der Temperatur ist die Strahlungsleistung bei realen Strahlern ebenfalls vom Emissionsgrad abhängig, welcher durch Faktoren wie beispielsweise der Oberflächenbeschaffenheit oder dem Beobachtungswinkel beeinflusst wird.

3.2 Die Infrarotkamera als digitales Messinstrument

Während herkömmliche Digitalkameras die von Objekten gestreute oder reflektierte Strahlung im sichtbaren Spektralbereich detektieren, verfügen IR-Kameras über Sensoren, die die ausgesendete thermische Strahlung im Infrarotbereich registrieren (Vollmer et al., 2001). Dabei kann das tatsächlich detektierte Signal durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden. Die größte Einschränkung ergibt sich durch die Atmosphäre, welche die Strahlung auf dem Weg vom Objekt zum Detektor abschwächt; es gelangt aber auch Strahlung anderer Objekte direkt oder auch indirekt durch Reflexion zum Detektor. Aufgrund der Transmissionseigenschaften der Atmosphäre, aber auch der Strahlungseigenschaften der Messobjekte, nutzen die meisten IR-Kameras nicht den gesamten Infrarotbereich, sondern je nach Kameratyp eher langwellige IR-Strahlung ($8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$) oder eher kurzwellige IR-Strahlung ($3,5 \mu\text{m} - 5,5 \mu\text{m}$). Ein typischer Messbereich geht von 0°C bis 1000°C , wobei die maximale Wellenlänge in der Region von $2 - 20 \mu\text{m}$ liegt (Möllmann & Vollmer, 2007; Vollmer et al., 2001). Ebenfalls sind die verwendete Optik sowie die eingesetzten Detektoren von Bedeutung (Vollmer et al., 2001).

Da die Signalgröße maßgeblich von der Temperatur und vom Emissionsgrad des Beobachtungsobjektes abhängt, kann mit Kenntnis des Emissionsgrades die Temperatur des Objektes berechnet werden (Möllmann & Vollmer, 2000). Anders als bei (IR-)Thermometern kann jedoch nicht nur ein Datenpunkt, also nur ein lokaler Temperaturwert ermittelt werden, sondern es werden tausende Datenpunkte zur gleichen Zeit aufgenommen. Dies ermöglicht die Bestimmung einer flächenhaften Temperaturverteilung und somit einen Gesamteindruck über das Oberflächentemperaturprofil des Beobachtungsbereichs (Möllmann & Vollmer, 2000; Weichsel, Strahl & Müller, 2008; Xie, 2012a).

Das vom Detektor empfangene Signal wird in einen Temperaturwert überführt und in eine zweidimensionale digitale, visuelle Darstellung der Oberflächentemperatur im detektierten Bereich übersetzt (Vollmer & Möllmann, 2010b). Dabei werden Bereiche und Objekte unterschiedlicher Temperaturen farblich verschieden skaliert. Da Temperaturänderungen eine Änderung der Signalgröße bewirken, können diese im Oberflächentemperaturprofil am Bildschirm der Kamera nahezu in Echtzeit beobachtet werden (Möllmann & Vollmer, 2000).

Zusätzlich beeinflusst die Auflösung des Detektors einer IR-Kamera das aufgenommene IR-Bild. Hierbei wird zwischen der thermischen und der geometrischen Auflösung unterschieden. Unter der thermischen Auflösung wird der kleinste Temperaturunterschied verstanden, den

die Kamera erfassen kann. Eine hohe thermische Auflösung wird bei Messungen benötigt, bei der nur kleine Temperaturunterschiede zu erwarten sind. Die geometrische Auflösung einer IR-Kamera entscheidet über die Schärfe der Bildkontur, also inwiefern die erreichte thermische Auflösung bildhaft umgesetzt werden kann. Bei einer hohen geometrischen Auflösung können kleinere Bereiche innerhalb eines großen Untersuchungsbereichs auch aus größerer Entfernung identifiziert werden. Je geringer die geometrische Auflösung, desto schlechter erkennbar sind im Infrarotbild kleine Objekte, wie z. B. dünne Drähte.

Bei einem Infrarotbild (kurz: IR-Bild) mit klassischem Farbcode wird der höchsten Temperatur die Farbe Weiß bzw. Rot sowie der niedrigsten Dunkelblau zugeordnet (vgl. Abbildung 4).

Der Abbildung 4 kann beispielsweise entnommen werden, dass die Schnauze des Hundes sowie die Oberschenkel des Herrchens gegenüber den anderen Körperregionen eine höhere Temperatur aufweisen. Aus diesen Informationen können unter bestimmten Bedingungen Rückschlüsse auf die Isolationseigenschaften von Fell und Kleidung gezogen werden (vgl. hierzu Kapitel 3.3.2).



Abbildung 4: Infrarotbild eines Hundes.

3.2.1 Einfluss- und Störfaktoren

Neben der Temperatur eines Körpers hat der Emissionsgrad des betrachteten Objekts Einfluss auf die emittierte Wärmestrahlung. Dieser hängt von der Oberflächenbeschaffenheit, der Abstrahlungsrichtung, der Temperatur sowie dem Material des Körpers ab (Karstädt et al., 1998; Vollmer & Möllmann, 2010a). Ein Objekt, das die Materialabhängigkeit der Strahlung verdeutlicht, ist der Leslie-Würfel. Ein Leslie-Würfel ist ein Aluminiumhohlwürfel, dessen vier Seiten der Mantelfläche sich in ihrer Oberflächenstruktur unterscheiden; eine schwarz lackierte Fläche, eine weiß lackierte Fläche, eine polierte und eine unbehandelte Fläche. Der Würfel wird

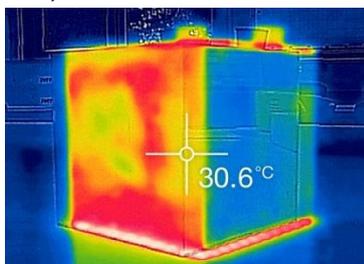


Abbildung 5: Infrarotbild eines Leslie-Würfels aus Aluminium. Fotografiert wurden die polierte sowie die unpolierte Fläche.

von innen beheizt und nach Einstellung des Temperaturgleichgewichts mit einer IR-Kamera betrachtet. Alle Flächen des Würfels haben die gleiche Temperatur, die IR-Kamera stellt jedoch scheinbare Unterschiede in der Temperatur fest (vgl. Abbildung 5). Dies liegt daran, dass die metallische, auf Hochglanz polierte Fläche am wenigsten Strahlung emittiert, während die schwarze Fläche am meisten Strahlung aussendet (Möllmann & Vollmer,

2007). Der Emissionsgrad muss daher bei der Interpretation des IR-Bildes berücksichtigt werden.

Trifft IR-Strahlung auf Objekte bzw. Oberflächenstrukturen, die im Verhältnis zur Wellenlänge um einiges größer sind, wird die Strahlung ähnlich wie sichtbares Licht an der Oberfläche gestreut oder reflektiert. Auf dem IR-Bild sind Spiegelbilder von Körpern höherer Temperatur auf Oberflächen von Körpern mit einer niedrigeren Temperatur zu beobachten. Wird zum Beispiel eine Hand in die Nähe einer reflektierenden Oberfläche gehalten, ist das thermische Spiegelbild der Hand auf dem Infrarotbild der Oberfläche zu sehen (vgl. Ab-

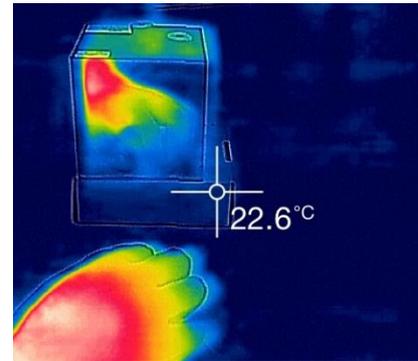


Abbildung 6: Infrarotbild einer thermischen Reflexion einer Hand an der unbehandelten Fläche des Würfels.

bildung 6). Dieser Effekt ist auch bei Oberflächen zu beobachten, deren Spiegelungseigenschaften im sichtbaren Spektralbereich nicht ausgeprägt sind, zum Beispiel die raue Metalloberfläche des Leslie-Würfels. Das Aufnehmen eines Wärmebilds von Objekten mit spiegelnden Oberflächen wie Glas und Metall ist daher mit Schwierigkeiten verbunden, da zum einen die Reflektion minimiert und zum anderen der Emissionsgrad berücksichtigt werden muss (Karstädt et al., 1998).

3.2.2 Die Infrarotkamera FlirOne

Neben den hochqualitativen IR-Kameras im gehobenen Preissegment mit sehr hoher thermischer und geometrischer Auflösung sind seit einigen Jahren auch Kameras erhältlich, die in Verbindung mit einem Smartphone oder Tablet verwendet werden.

Diese Kameras sind gegenüber den professionellen Geräten deutlich preisgünstiger und liegen im Bereich zwischen ca. 300€ bis 600€. Beispielhaft zu nennen sind hier die Produkte der Hersteller Flir Systems und Seek thermal. Im Rahmen der Studie wurde die Kamera FlirOne verwendet, die als externe Hardwareerweiterung mit einem iPad verbunden wird. Der Messbereich der Kamera FlirOne hat eine thermische Auflösung von 100mK in einem Messbereich von -20°C bis 120°C und verfügt über eine geometrische Auflösung von 160 x 120 Pixeln. Dies entspricht einer Temperaturmessung mit 19200 IR-Thermometern (Molz, Kuhn & Wilhelm, 2016). Eine Überprüfung der Messgenauigkeit der FlirOne IR-Kamera von Molz et al. (2016) ergibt eine Vergleichbarkeit der Messdaten der FlirOne mit professionellen IR-Kameras und eine Abweichung der Messwerte von 5% gegenüber der Messung mit einem Digitalthermometer.

Die IR-Kamera verfügt über eine dynamische Anpassung des Farbcodes, d. h. je nach den Temperaturunterschieden im Beobachtungsbereich kann sich die zugeordnete Farbe bei gleichbleibender Objekttemperatur verändern. Im Infrarotbild wird ein Fadenkreuz mit einem Temperaturschätzwert angegeben, es wird jedoch keine Skala angezeigt, die die Temperaturspanne mit den Farben in Verbindung bringt. Die FlirOne Kamera ist zusätzlich zum Infrarotdetektor mit einem weiteren Sensor ausgestattet, der optische Daten aufnimmt. Per MSX-Technik (MSX: Multi Spectral Dynamic Imaging) werden über das Wärmebild visuelle Details wie der Umriss von Gegenständen gelegt, die das Erkennen von Objekten erleichtert (FLIR Systems, 2017). Mit Hilfe dieser Technik wird mit der FlirOne trotz der eher geringen Pixelanzahl ein gutes Bild erreicht (Molz et al., 2016). Die MSX-Technik birgt jedoch ebenfalls die Besonderheit, dass es bei der Unterschreitung des empfohlenen Mindestabstands von ca. 100cm zu einer Verschiebung der Überlagerung des Digitalkamerabildes und des Infrarotbildes kommt. Die temperaturerhöhten Bereiche werden dann versetzt zu den Umrissen der Objekte dargestellt (vgl. Abbildung 7). Ursache dieses Darstellungsfehlers sind die unterschiedlich positionierten Detektoren der FlirOne. Dies lässt sich jedoch über einen Schieberegler korrigieren.

Die Video- und Fotoaufnahmen lassen sich auf dem Tablet oder Smartphone speichern und im Menü unter *FLIR-Bibliothek* aufrufen. Bei Bilddateien wird zusätzlich zum Infrarotbild ein Foto aufgenommen und die beiden Bilder übereinandergelegt. Diese können durch Wischen ineinander umgewandelt werden (vgl. Abbildung 7). Innerhalb der Bilddateien lässt sich unter dem Punkt *Bearbeiten* zudem das Temperaturfadenkreuz verschieben und somit an jeder beliebigen Stelle ein Temperaturschätzwert anzeigen. Diese Möglichkeit gibt es bei Videoaufnahmen jedoch nicht. Dennoch haben Videoaufnahmen den Vorteil, dass mit ihnen schnell ablaufende Prozesse aufgezeichnet und zu einem späteren Zeitpunkt erneut abgespielt und angehalten werden können. Hier zeigt sich eine Überlegenheit von Tablets gegenüber statischen Medien: die Darstellung von komplexen naturwissenschaftlichen Prozessen durch Videos (Ulrich, Schwiter & Schanze, 2014).

Mit Hilfe der zugehörigen App lassen sich neben der Wahl verschiedener Farbfilter ebenfalls Einstellungen zum Emissionsgrad vornehmen. Hierbei wird zwischen *matt*,

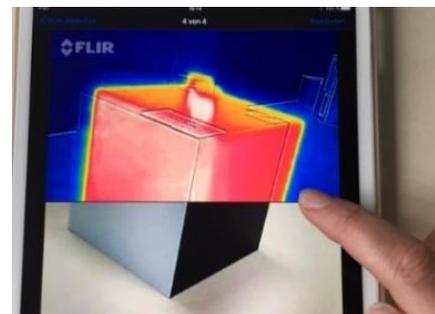


Abbildung 7: Überlagerung des digitalen Bildes und des Infrarotbildes aufgenommen mit der Flir One Kamera. Durch die Unterschreitung des Mindestabstands ist hier ebenfalls die Verschiebung der beiden Bilder gegeneinander zu sehen.

halbmatt oder *seidenmatt* unterschieden. Laut Hersteller ist die Einstellung *matt* am besten geeignet, um für viele verschiedene Materialien eine gute Näherungsmessung der Temperatur zu erzielen. Es besteht hier ebenfalls die Möglichkeit, die dynamische Farbanpassung zu deaktivieren und die Temperaturspanne und damit auch den Farbcode basierend auf dem Beobachtungsbereich festzulegen (Molz et al., 2016). Allerdings kommt es bei dieser Funktion häufig zu einer Störung des Farbcodes, bei der sich das IR-Bild im Betrieb unabhängig von der Temperatur im Beobachtungsbereich einheitlich dunkelblau färbt und keine Beobachtung mehr möglich ist.

IR-Kameras sind geeignet, um **Temperaturtopografien von Objektoberflächen** aufzunehmen und diese bildlich darzustellen. Dabei werden Bereiche und Objekte unterschiedlicher Temperaturen farblich skaliert, wobei hohe Prozessorgeschwindigkeiten eine Darstellung in nahezu Echtzeit erlauben. Bei der **Interpretation** von IR-Bildmaterial sind Einfluss- bzw. Störfaktoren wie der **Emissionsgrad sowie Reflexionseigenschaften** zu berücksichtigen. Beispielsweise können im IR-Bild Objekten gleicher Temperatur, jedoch unterschiedlichen Materials oder Oberflächenbeschaffenheit, verschiedene Farben zugeordnet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird die **IR-Kamera FlirOne** verwendet, die über eine thermische Auflösung von 100mK in einem Messbereich von -20°C bis 120°C verfügt. Herauszustellen ist, dass diese IR-Kamera im IR-Bild zusätzlich die Umrisse von Objekten anzeigt.

3.3 „Sehen“ mit einer Infrarotkamera

3.3.1 Die Infrarotkamera als Sehbereichserweiterung

Für das menschliche Auge ist der sichtbare Spektralbereich auf Strahlung der Wellenlängen von 380nm bis 780nm begrenzt. Die von Objekten ausgesendete Infrarotstrahlung erstreckt sich über einen Wellenlängenbereich von 780nm bis 1mm und ist somit für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar. Mit einer IR-Kamera gelingt durch die digitale Bildverarbeitung also die Veranschaulichung von thermischen Vorgängen, die für das menschliche Auge unsichtbar sind (Möllmann & Vollmer, 2000); es hat eine Erweiterung des Sehbereichs in den Infrarotbereich stattgefunden (Greinert & Weißnigk, 2017). Der intuitive, benutzerfreundliche Zugang mittels IR-Kamera verschiebt den Fokus von der bisher quantitativen Erfassung von Messwerten und Graphen auf einen eher qualitativen Ansatz (Haglund, Hedberg & Schönborn, 2015; Nordmeier et al., 2008). Verglichen mit einem Temperatursensor, der Daten in Form von Zahlen und Messgraphen ausgibt, zeigt die IR-Kamera eine Darstellung, die überzeugender und

verständlicher für Lernende sein kann (Haglund, Hedberg et al., 2015; Xie, 2011). Während Lernende aufgenommene Messwerte zunächst in einem abstrakten kognitiven Prozess zu einem Gesamteindruck konstruieren müssen, kann mit der IR-Kamera ein solcher Gesamteindruck des Beobachtungsbereichs unmittelbar erfasst werden (Weichsel et al., 2008). Zusammengefasst bietet die IR-Kamera durch das Hinzufügen visueller Informationen die Chance einer erweiterten Sinneswahrnehmung von Phänomenen.

Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass Lernende im Gegensatz zum sichtbaren Spektralbereich mit dieser Art des Sehens keine oder nur punktuelle Erfahrungen haben, sodass keine gesicherte Erfahrungsbasis vorliegt. Darüber hinaus ist das Verständnis von thermischen Phänomenen der Lernenden stark von ihrem haptisch-sensorischen Eindrücken geprägt: Das Verständnis hängt demnach bisher davon ab, was die Lernenden fühlen und nicht von dem was sie sehen (Schönborn, Haglund & Xie, 2014). Das Interpretieren der neuen visuellen Inputs muss in dem Zusammenhang erst erlernt werden. Gelingt jedoch eine Verarbeitung der Informationen über beide sensorischen Inputs, kann sich dies förderlich auf das Verstehen der Phänomene auswirken (Schönborn et al., 2014). Hierfür müssen die durch IR-Bilder zur Verfügung gestellten visuellen Informationen im Rahmen von Verarbeitungsprozessen jedoch in die bestehende Wissensbasis integriert werden. Im Folgenden werden Modelle des ablaufenden Verarbeitungsprozesses und insbesondere des Vorgangs des Bildverstehens vorgestellt.

3.3.2 Psychologischer Informationsverarbeitungsprozess und Bilderverstehen

Bilder dienen unter anderem der Kommunikation von Informationen, die verarbeitet werden müssen. Nach Schnotz (2005) beginnt der Verarbeitungsprozess mit der Aufnahme der Informationen durch die Augen in den sensorischen Speicher. Richtet der Betrachter des Bildes die Aufmerksamkeit auf eine im Bild enthaltene Information, wird diese vom sensorischen Speicher ins visuelle Arbeitsgedächtnis übertragen. Damit Informationen ins Langzeitgedächtnis überführt werden, müssen bestimmte Verarbeitungsprozesse im Arbeitsgedächtnis angeregt werden (Kerres, 2018). Hierzu gehört das *Verstehen*. Die Ergebnisse des Verstehensprozesses werden im Langzeitgedächtnis gespeichert (Hartig, 2014). Dies gelingt durch die Verknüpfung der neuen Informationen mit Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis. Lernen wird in diesem Zusammenhang als Veränderung oder Erweiterung vorliegender Schemata aufgefasst (Kerres, 2018). Damit also von Bildern gelernt werden kann, müssen diese zunächst *verstanden* werden.

Psychologisches Modell des Bildverstehens

Der Vorgang des Bildverstehens kann nach Weidenmann (2007) durch ein Modell mit zwei Verstehensmodi näher beschrieben werden: dem ökonomischen Bildverstehen und dem indikatorischen Bildverstehen. Dabei umfasst der ökonomische Modus des Bildverstehens das Identifizieren des auf dem Bild Dargestellten; der indikatorische Modus beinhaltet das Verständnis, welche Informationen das Bild kommunizieren soll²² (Weidenmann, 2007).

Dieses Modell soll am Beispiel von Abbildung 8 näher erläutert werden. Hierbei handelt es sich auf den ersten Blick um ein falschfarbened²³ Bild einer Tasse auf einem Tisch. Durch Darstellungscodes, die „das Erkennen eines Gegenstands analog zum Erkennen in der Natur erleichtern“ (Weidenmann, 2007, S. 152), kann das ökonomische Bildverstehen unterstützt werden. Ein solcher Darstellungscodes stellt in diesem IR-Bild der durch die MSX-Technik zusätzlich eingefügte Umriss des Objekts dar, durch den die Tasse leichter als solche zu erkennen ist. Das indikatorische Bildverstehen bedeutet, dass das visuelle Argument des Bildes erkannt werden muss. Unter anderem wird hier Wissen über den Bildursprung wie beispielsweise der Kontext der Bildproduktion mit einbezogen (Hartig, 2014). Bei diesem Beispiel ist das visuelle Argument des IR-Bildes, dass eine Energieübertragung von der Tasse zum Tisch stattgefunden hat. Das Bild soll demnach im Kontext einer energetischen Betrachtung der Vorgänge Evidenz für Wärmeleitung bieten. Hierbei sind die Farben des Bildes Indikatoren für die Temperatur im Bildbereich. Der Farbcode wird demnach zur Steuerung der Wahrnehmung des Betrachters verwendet; es handelt sich um einen Steuerungscode. Die Farbabstufungen sollen dem Beobachter signalisieren, ob es sich im Bezugsrahmen um eine vergleichsweise hohe oder niedrige Temperatur handelt. Die Tasse und der Tisch neben der Tasse weisen gegenüber der Umgebung eine erhöhte Temperatur auf.

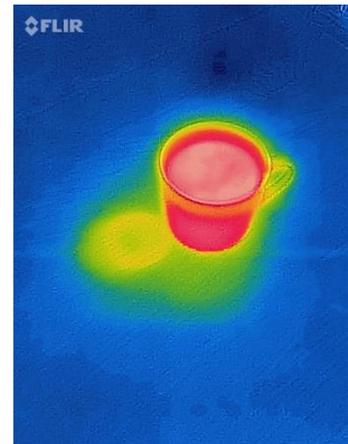


Abbildung 8: IR-Bild einer Tasse.

Der Wissenserwerb mit dem Bild gelingt nur, wenn sowohl der Darstellungscodes der Umrisse als auch der Steuerungscode der Farben verarbeitet werden (vgl. Weidenmann, 2007). Werkzeuge für das Verstehen und Schlussfolgern sind mentale Modelle (Weidenmann, 2007,

Der Wissenserwerb mit dem Bild gelingt nur, wenn sowohl der Darstellungscodes der Umrisse als auch der Steuerungscode der Farben verarbeitet werden (vgl. Weidenmann, 2007). Werkzeuge für das Verstehen und Schlussfolgern sind mentale Modelle (Weidenmann, 2007,

²² Beide Modi können sowohl präattentiv, d. h. ohne bewussten Einfluss oder Anstrengung ablaufen als auch attentiv, also mit bewusster Aufmerksamkeit (Weidenmann, 2007).

²³ Mit „falschfarben“ ist gemeint, dass die Farben nicht den natürlichen Farben entsprechen, sondern auf Grundlage bestimmter Eigenschaften andersfarben eingefärbt wurden.

S. 157), die auf Grundlage der stabilen, lebensweltlichen Erfahrungen und erlernten Informationen gebildet werden (Lange, Heilbron & Kok, 2018).

Mit Bezug auf das IR-Bild in Abbildung 8 muss der Betrachter beispielsweise über grundlegende Kenntnisse des Energiekonzepts verfügen, damit ein Verstehen des Bildes als Evidenz für Wärmeleitung gelingen kann:

Auf Grundlage der lebensweltlichen Erfahrungen ist bekannt, dass heiße Getränke eine Temperaturerhöhung der Tasse und des Tisches unterhalb der Tasse bewirken. Eine Schlussfolgerung könnte also lauten, dass der Tee den Tisch erwärmt hat. Diese Schlussfolgerung trifft jedoch nicht das visuelle Argument des Bildes. Es fehlt eine Betrachtung aus energetischer Sicht. Im IR-Bild ist jedoch nicht zu sehen, dass Energie von der Tasse auf den Tisch übertragen wurde, d. h. die Information der Wärmeleitung im Rahmen von Konduktion lässt sich auch durch die Codes dem Bild nicht direkt entnehmen. Hierfür muss die Temperatur als Indikator für die innere Energie identifiziert werden und auf eine Energieübertragung von der Tasse zum Tisch geschlossen werden. Demnach liefert das IR-Bild nicht per se Evidenz für Wärmeleitung; es muss zunächst das domänenspezifische Vorwissen aktiviert und auf dieser Grundlage eine Bedeutungszuweisung als Evidenz für eine solche Wärmeleitung stattfinden.

Folglich muss der Betrachter bereits über Teile des betreffenden mentalen Modells verfügen, um ein Bild, das auf dieses mentale Modell abzielt, verstehen zu können (Weidenmann, 2007, S. 152). Ein Fehlen der zum Verständnis notwendigen mentalen Modelle schränkt den tatsächlichen Aussagewert eines IR-Bildes für den Lerner ein; das visuelle Argument wird nicht erkannt.

Ebenfalls zu berücksichtigen ist, dass die Bildwahrnehmung wesentlich von den mentalen Modellen, also den zuvor gemachten Erfahrungen bzw. den Vorkenntnissen des Betrachters, beeinflusst wird (Lange et al., 2018). Dies wird im Folgenden näher beschrieben.

Einfluss des Vorwissens auf die Wahrnehmung von Bildern

Auf Grundlage der internen Modelle werden zukünftig eingehende Erfahrungen vorhergesagt (Lange et al., 2018). Diese Erwartungen können die Wahrnehmung dahingegen verzerren, wie gut und vor allem was beispielsweise bei der Betrachtung eines Bildes wahrgenommen wird. Diese Beeinflussung wird durch das Betrachten von Abbildung 9 deutlich: Vor dem Hintergrund der lebensweltlichen Erfahrung, dass Licht in der Regel von oben auf Objekte scheint, erscheinen die Kreise als konvex bzw. konkav (Lange et al., 2018).

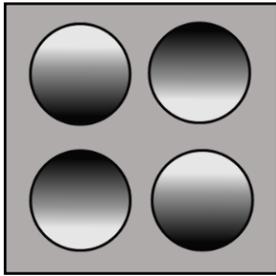


Abbildung 9: Beispiel der Beeinflussung der Wahrnehmung durch Vorwissen (in Anlehnung an Lange et al., 2018).

Dieser Einfluss von Erwartungen, die auf internen Modellen und Vorstellungen basieren, kann ebenfalls im Zusammenhang mit der Wahrnehmung physikalischer Phänomene beobachtet werden. Schlichting (1991) beschreibt exemplarisch ein Experiment, mit dem Vorstellungen über das Glühverhalten eines Drahtes als instantanes Fließverhalten des elektrischen Stromes entwickelt werden soll. In diesem Rahmen wurden Lernende zunächst aufgefordert, Vorhersagen bezüglich des Glühverhaltens nach Schließen des Stromkreises zu tätigen. Es ließen sich im Wesentlichen drei unterschiedliche Schülervorstellungen identifizieren: Der Draht erglüht in Fließrichtung des Stromes, der Draht fängt zunächst in der Mitte an zu glühen, wobei sich dieses Glühen mit der Zeit auf die Enden ausbreitet und die Vorhersage eines gleichmäßigen Erglühens des gesamten Drahtes (Schlichting, 1991). Die Abfrage der Beobachtungen nach Durchführung des Experiments ergab, dass die Lernenden je nach Vorhersage die zu ihrer Vorhersage passende Beobachtung äußerten. Die Beobachtung hing also von der Erwartung der Lernenden ab (Schlichting, 1991).

Was Lernende bei der Betrachtung eines IR-Bildes sehen, hängt demnach auch davon ab, über welche Erwartungen bzw. domänenspezifisches Vorwissen die Lernenden verfügen (vgl. (Lange et al., 2018; Schlichting, 1991). Ebenso hängt die Wahrnehmung stark von der Eindeutigkeit des betrachteten Bildes oder Vorgangs ab (Lange et al., 2018). Dies bedeutet, dass das zu beobachtende Phänomen innerhalb eines IR-Bildes oder -videos eindeutig beobachtbar sein sollte, auch unter Berücksichtigung möglicher Störfaktoren (vgl. Kapitel 3.2.1).

Die IR-Kamera bietet durch das Hinzufügen visueller Informationen die Möglichkeit einer **Sehbereichserweiterung in den Infrarotbereich**. Die visuellen Informationen müssen durch kognitive Verarbeitungsprozesse in die bisherige durch haptische Eindrücke geprägte Wissensbasis thermischer Phänomene integriert werden.

Der Prozess des Bildverstehens kann vereinfacht durch ein Modell mit zwei Verstehensmodi beschrieben werden. Dabei umfasst der ökonomische Modus das Identifizieren, was auf dem Bild dargestellt ist. Dieses Verständnis kann bei einem IR-Bild durch das Einfügen von Darstellungscodes wie beispielsweise Objektumrisse unterstützt werden. Der indikatorische Modus impliziert das Verständnis, welche Informationen das Bild kommunizieren soll. Beim Verstehen von IR-Bildern muss hierfür der Steuerungscode der Farbcodierung verarbeitet werden. **Damit ein IR-Bild jedoch beispielsweise als Evidenz für Energietransfer interpretiert werden**

kann, muss der Betrachter darüber hinaus bereits über Vorkenntnisse (mentale Modelle) zum Energiekonzept verfügen. Diese mentalen Modelle sind Grundlage für die Bedeutungszuweisung des IR-Bildes als Evidenz für Energietransfer; ein Fehlen schränkt den Aussagewert des Bildes ein. Auch die Wahrnehmung von Bildern wird durch die mentalen Modelle des Betrachters beeinflusst.

Wenn IR-Bilder mit dem Ziel eingesetzt werden sollen, Lernprozesse zu unterstützen oder anzuregen, ist demnach die **Kenntnis der Vorstellungen und Erfahrungen** notwendig, über die Lernende verfügen.

3.4 Herausforderungen beim Lernen mit Infrarotbildmaterial

Sowohl in der Fachliteratur als auch in der Fachdidaktik werden die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der IR-Kamera in Forschung und Lehre betont (z.B. Haglund, Hedberg et al., 2015; Karstädt et al., 1998; Möllmann & Vollmer, 2000; Xie & Hazzard, 2011; Xie, 2011). Demgegenüber lassen sich jedoch nur wenige Forschungsergebnisse zu den Vorstellungen von Lernenden bezüglich unsichtbarer Strahlung, der Funktionsweise der Kamera sowie der Interpretation der IR-Bilder finden (Meiringer, 2013).

In den folgenden Unterkapiteln wird ein Überblick über die bekannten Schülervorstellungen im Zusammenhang mit unsichtbarer Strahlung, Messtechnik sowie IR-Bildmaterial gegeben.

3.4.1 Vorstellungen zu unsichtbarer Strahlung

Während Schülervorstellungen zur sichtbaren Strahlung im Bereich der Optik umfangreich erforscht wurden, gibt es über die Vorstellungen zur unsichtbaren Strahlung nur wenige Erkenntnisse (Asghar, Libarkin & Crockett, 2001; S. Neumann & Hopf, 2011). Jedoch lassen sich die Vorstellungen zum sichtbaren Licht im Bereich der Optik nicht generell auf unsichtbare Strahlung übertragen (S. Neumann & Hopf, 2011), u. a. da eine Verknüpfung von Licht mit Strahlung Schülerinnen und Schülern nicht immer gelingt (S. Neumann & Hopf, 2012).

Mittels Fragebögen und Interviews untersuchten Asghar et al. (2001) die Vorstellungen zu ultravioletter Strahlung und Infrarotstrahlung von Lernenden der Sekundarstufe I sowie von Lehrpersonen. Sie stellten ein nur schwach ausgeprägtes Wissen über die Strahlungsarten fest: UV-Strahlung beschrieben die Befragten als eine sichtbare und sehr helle Strahlung, die von der Sonne kommt und aufgrund der Assoziation mit Hautkrebs als gefährlich eingestuft wurde. Demgegenüber verfügen die Befragten über kein entwickeltes Konzept von IR-

Strahlung. Neben den militärischen Einsatzgebieten von IR-Brillen konnten die Befragten keine weiteren Angaben über diese Strahlungsart machen (Asghar et al., 2001).

S. Neumann und Hopf (2011) erhoben mithilfe von Zeichnungen in den Klassenstufen 4-6 in Kombination mit Interviews, was Schülerinnen und Schüler mit dem Begriff ‚Strahlung‘ verbinden. Die Ergebnisse zeigten, dass jüngere Schülerinnen und Schüler überwiegend Strahlungsquellen von sichtbarer Strahlung zeichneten, wobei die Sonne zu den häufigsten Motiven zählte. Mit zunehmendem Alter malten Schülerinnen und Schüler ebenfalls Strahlungsquellen unsichtbarer Strahlung, wie beispielweise elektrische Geräte. Aber auch Radioaktivität wurde mit diesem Begriff assoziiert (S. Neumann & Hopf, 2011). In einer Interviewstudie von S. Neumann und Hopf (2012) wurde Strahlung von Gymnasialkindern im Alter von 14-16 Jahren als unnatürlich eingestuft, die Teilnehmenden brachten nur selten das sichtbare Licht mit dem Begriff ‚Strahlung‘ in Verbindung. Die Strahlung elektrischer Geräte wurde überwiegend als gefährlich eingestuft, wobei diese für Umweltprobleme wie das Ozonloch verantwortlich gemacht wurde. Eine Unterscheidung zwischen Materiestrahlung und elektromagnetischer Strahlung gelang den Befragten nicht (S. Neumann & Hopf, 2012). Darüber hinaus zeigte sich in dieser Untersuchung, dass Schülerinnen und Schüler rund 10 Jahre nach der Befragung von Asghar et al. (2001) über Wissen zur IR-Strahlung verfügen. Diese wird überwiegend als unsichtbar beschrieben. Nur ein Viertel der interviewten Schülerinnen und Schüler stimmten der Aussage zu, dass alle Körper thermische Strahlung aussenden (S. Neumann & Hopf, 2012).

3.4.2 Vorstellungen zur Infrarotkamera und zu Infrarotbildmaterial

Im Rahmen einer Interviewstudie von Meiringer (2013) wurden acht Schülerinnen und Schüler (sechs Teilnehmende aus der Oberstufe und zwei aus der Unterstufe) zur Kenntnis und Funktionsweise einer IR-Kamera befragt. Allen Befragten waren die Bilder einer IR-Kamera bekannt, wobei als Informationsquellen Dokumentationen, Kriminalfilme und die Feuerwehr genannt wurden (Meiringer, 2013). Allerdings zeigte die Hälfte der Befragten eine Assoziation der Bilder mit dem Begriff „Wärmebildkamera“; alle Befragten gaben als Messgröße der IR-Kamera den Begriff ‚Wärme‘ an (Meiringer, 2013). Hinsichtlich der prinzipiellen *Funktionsweise* der Kamera konnte der Messvorgang von keinem der Befragten erklärt werden. Hier zeigten sich Vorstellungen, die mit der Sehstrahlenvorstellung im sichtbaren Spektralbereich korrespondieren: Drei Viertel der Schülerinnen und Schüler vermuteten, dass die Kamera die IR-Strahlung aussende, diese dann von Gegenständen reflektiert würde und zurück zur

Kamera gelange (Meiringer, 2013). Dabei unterschieden einige Schülerinnen und Schüler nicht zwischen verschiedenen Strahlungsarten, sie sprachen der IR-Kamera ebenfalls die Fähigkeit zu, radioaktive Strahlung oder generell elektromagnetische Strahlung elektrischer Geräte detektieren zu können (Meiringer, 2013).

Bei der Interpretation der IR-Bilder gelang allen Befragten eine korrekte *Zuordnung der Farben zur Temperatur der Objekte*, wobei die Farbe Rot höheren und Blau niedrigeren Temperaturen zugeordnet werden konnte (Meiringer, 2013).

Es ließen sich ebenfalls Parallelen zu bereits bekannten Vorstellungen zu Wärme und Temperatur feststellen (vgl. Kapitel 2.4.1.2): Beispielweise ordneten einige Schülerinnen und Schüler Glas generell die Eigenschaft ‚kalt‘ zu (Meiringer, 2013). Die im IR-Bild angegebene *Temperaturskala bzw. der Temperaturschätzwert* wurde von den meisten Befragten bei der Interpretation nicht oder fehlerhaft verwendet (Meiringer, 2013).

Dies konnte ebenfalls von Hoppe (2018) im Rahmen einer Interviewstudie bei einer Stichprobengröße von 13 Schülerinnen und Schülern aus der 7. Jahrgangsstufe beobachtet werden: In dieser Studie wurden mittels Eyetracking Daten gewonnen, die Auskunft über die Bildbereiche geben, die von den Schülerinnen und Schüler betrachtet werden. Obwohl alle Schülerinnen und Schüler den angezeigten Temperaturschätzwert betrachteten, bezogen sie diesen in ihrer Beschreibung nicht ein, sondern verwendeten vorwiegend die Begriffe ‚warm‘ und ‚kalt‘ (Hoppe, 2018).

In beiden Studien wurden IR-Kameras mit dynamischer Anpassung der Farbskala verwendet, sodass gleiche Temperaturen in unterschiedlichen Zusammenhängen durch verschiedene Farben repräsentiert wurden. Sowohl bei Meiringer (2013) als auch bei Hoppe (2018) konnten Schwierigkeiten bei der Interpretation dieser *dynamischen Skalenanpassung* beobachtet werden. Änderte sich die Farbskalierung im Beobachtungsbereich, beispielweise durch das Hinzufügen oder Entfernen von Objekten höherer oder niedrigerer Temperatur, gaben einige Befragte als Ursache eine Änderung der Temperatur in diesem Bereich durch den Wind oder einen Föhn an (Hoppe, 2018; Meiringer, 2013).

Eine weitere Störquelle stellten in IR-Bildern *thermische Reflexionen* dar. Hoppe (2018) beobachtete bei der Interpretation Schwierigkeiten im Zusammenhang mit bekannten Schülervorstellungen zu Metallen wie „*Metall wird schnell warm*“, konnte aber auch anknüpfungsfähige Vorstellungen wie „*der Teller wird im Metalllöffel gespiegelt*“ feststellen (ebd.). Der durch *Wärmeübertragungen* hervorgerufene Farbumschlag, wie beispielsweise der „Abdruck“ einer

Teetasse bzw. eines Milchkännchens auf dem Tisch, konnte überwiegend nur bei der Teetasse korrekt gedeutet werden (Hoppe, 2018). Die dunklere Färbung der Stelle, an der das Milchkännchen gestanden hat, unterstützte z.T. die Vorstellung der Schülerinnen und Schüler, es hätte ‚Kälte übertragen‘ (Hoppe, 2018).

Mittels Eyetracking untersuchte Hoppe (2018) ebenfalls die Bildelemente, die Schülerinnen und Schüler auf vorgegebenen Infrarotbildern betrachteten: Hierfür haben sechs Teilnehmende eine dreiteilige Bilderfolge erhalten, auf denen das IR-Bild zweier Wagen, die eine schiefe Ebene herunterrutschen bzw. fahren, zu sehen war. Die Infrarotbilder zeigten beim rutschenden Wagen eine deutliche Temperaturerhöhung von Rampe und Wagen, während die Temperaturerhöhung des fahrenden Wagens geringer dargestellt wurde (vgl. Abbildung 10). Obwohl alle Befragten die rote Spur auf dem IR-Bild betrachteten, zogen diese nur die Hälfte zur Interpretation der IR-Bilderreihe heran (Hoppe, 2018).

Zusammenfassend liefern die beiden Studien von Meiringer (2013) und Hoppe (2018) Hinweise darauf, dass die Vorstellungen über die Funktionsweise der IR-Kameras sowie über IR-Bilder mit den bekannten Schülervorstellungen über Wärme und Temperatur korrespondieren (vgl. Kapitel 2.4.1.2). Diese Beobachtungen konnten ebenfalls in der Studie von Haglund und Jeppsson et al. (2015) gemacht werden.

Die Schülerinnen und Schüler bringen die Farbcodierung zwar mit hohen bzw. niedrigeren Temperaturwerten in Verbindung, berücksichtigen jedoch meist die Temperaturschätzwerte in Skalen- oder Fadenkreuzform nicht. Die dynamische Anpassung der Farbskala, die eine Änderung der Zuordnung von Farbe zur Temperatur zur Folge hat, führt bei den Schülerinnen und Schülern zu Fehlinterpretationen der IR-Bilder. Störfaktoren wie thermische Reflexionen können nur teilweise richtig gedeutet werden. Obwohl die Schülerinnen und Schüler für Prozesse relevante Bereiche im Infrarotbild betrachten, ziehen sie diese nicht immer zur Erklärung heran.

3.4.3 Wahrnehmung und Interpretation

Im Rahmen einer Reihe von Schülerlaboraktivitäten untersuchten Haglund und Hedberg et al. (2015) das Experimentierverhalten zweier Paare von Lernenden einer 7. Klasse, denen zusätzlich IR-Bildmaterial zur Verfügung gestellt wurde. Diese Aktivitäten basierten auf dem Predict-Observe-Explain (POE)-Ansatz von White und Gunstone (1992), bei dem Lernende zunächst den Ausgang des Experiments vorhersagen, danach eine Beschreibung des Gesehenen vornehmen und als letzten Schritt ihre Vorhersage mit dem Gesehenen in Einklang bringen

müssen. In diesem Zusammenhang sollten die Lernenden ein Metallstück, ein Stück Holz und eine Wollmütze hinsichtlich ihrer Temperatur vergleichen und zunächst eine Vorhersage treffen. Zur Überprüfung ihrer Vermutungen nutzten beide Paare zur Messung ein Digitalthermometer, wobei ein Paar zusätzlich statische IR-Bilder der Experimente erhielt. Haglund und Hedberg et al. (2015) stellten bei beiden Paaren einen kognitiven Konflikt hinsichtlich des Ergebnisses fest, dass Metall, Holz und Wolle entgegen ihrer haptischen sensorischen Wahrnehmung die gleiche Temperatur aufweisen. Der Konflikt beider Schülerpaare konnte nicht gelöst werden (Haglund, Hedberg et al., 2015).

Im Zusammenhang mit dem Phänomen der Wärmeleitung wurde ein Experiment gewählt, bei dem ein Metallstück mit dem Daumen berührt wird. Das Paar, welches zusätzlich die IR-Bilder nutzte, interpretierte das Bild von Daumen und Metall nicht als Wärmeleitung, sondern als Erwärmung des Metalls in Folge des Kontakts mit dem Daumen. Dabei argumentierten sie weder mit Wärme noch mit Energie. Haglund und Hedberg et al. (2015) nennen als Ursache für dieses Ergebnis fehlende Modelle zur Wärmeleitung.

Daher wurde den Lernenden im Rahmen einer Folgeuntersuchung zunächst Gelegenheit gegeben, ein Modell zur Wärmeleitung zu entwickeln. In diesem Zusammenhang erhielten zwei Schulklassen der 4. Jahrgangsstufe zunächst eine Einführung in die Wärmeleitung (Konduktion) bzw. isolierende Eigenschaften verschiedener Materialien (Haglund, Hedberg et al., 2015). Im Anschluss wurden im Rahmen des POE-Ansatzes drei Experimente unter Verwendung einer IR-Kamera durchgeführt. Haglund und Hedberg et al. (2015) beobachteten, dass die Schülerinnen und Schüler in ihren Erklärungen erfolgreich das zuvor erlernte Modell anwendeten sowie darüber hinaus eigene Fragestellungen entwickelten und diese mittels IR-Kamera untersuchten.

Im Rahmen einer dritten Studie untersuchten Haglund und Jeppsson et al. (2015) Oberstufenschülerinnen und -schüler einer 11. Klasse beim Experimentieren mit IR-Kameras im POE-Ansatz. Sie stellten fest, dass die Lernenden häufig Alltagswissen bzw. Alltagserfahrungen zur Erklärung heranzogen. Im Zusammenhang mit der Wärmeleitung in Metallen zweifelten Schülerinnen und Schüler trotz hinreichender konzeptueller Kenntnisse über Wärmeleitung den identischen Temperaturmesswert für Holz und Metall an. Haglund und Jeppsson et al. (2015) schreiben diese Unsicherheit der Überzeugung zu, dass der Tastsinn Auskunft über die Temperatur von Objekten gibt (vgl. 2.4.1.2). Der Einsatz der IR-Kamera hat diese stark gefestigte Überzeugung nicht beeinflusst (Haglund, Jeppsson et al., 2015).

Weiterhin stellten Haglund und Jeppsson et al. (2015) einen Einfluss der Aufgabenformulierungen auf die Beobachtungen fest; beispielsweise konnten bei einer Station mit dem Titel „*Reibung*“ in den IR-Aufnahmen ebenfalls Beobachtungen zur Wärmeleitung gemacht werden, diese Beobachtungsmöglichkeiten wurden jedoch von den Schülerinnen und Schülern nicht weiter thematisiert.

In einer Untersuchung von Hoppe (2018) wurden sechs Schülerinnen und Schüler im Rahmen von Interviews im POE-Ansatz zur Vorhersage der Bewegung zweier Wagen aufgefordert. Dabei fuhr einer der Wagen auf seinen Rädern eine Rampe herunter, während der andere auf dem Wagendach die Rampe herunterrutschte. Die Schülerinnen und Schüler sollten zunächst eine Vorhersage treffen, welcher der beiden Wagen zuerst das Rampenende erreicht (ebd.). Zwar bezogen alle Schülerinnen und Schüler den Begriff der Reibung in ihre Überlegungen mit ein, jedoch sagten drei Lernende vorher, dass der Wagen, der „*mehr Reibung erzeuge*“, als erster am Ende der Rampe ankäme. Dies deutet auf eine nicht anknüpfungsfähige Vorstellung zum Reibungskonzept hin (Hoppe, 2018). Nur ein Schüler verwendete zur Vorhersage den zuvor im Unterricht thematisierten Energiebegriff.

Im nächsten Schritt erhielten die Schülerinnen und Schüler eine dreiteilige IR-Bilderfolge, die während des Vorgangs aufgenommen wurde und die Wagen zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf der Rampe zeigt (vgl. Abbildung 10).

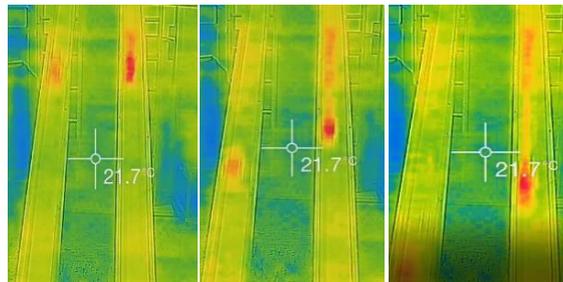


Abbildung 10: Bilderfolge des Rampenexperiments von Hoppe (2018).

Mittels Eyetracking konnte festgestellt werden, dass alle Befragten die von den Wagen hinterlassene Spur auf der Rampe im IR-Bild betrachtet haben. Zwei Lernende erklärten diese als Folge der Reibung. Dafür zogen sie einen Vergleich mit der Anwendung von Schleifpapier heran, bei der ebenfalls eine spürbare Temperaturerhöhung festzustellen sei (Hoppe, 2018). Dies korrespondiert mit den Ergebnissen von Daane et al. (2015), bei denen ebenfalls Szenarien zur Erklärung herangezogen wurden, bei denen eine bemerkbare Temperaturerhöhung stattfindet (vgl. Kapitel 2.4.2). Herauszustellen ist, dass die Hälfte der Lernenden die gesehene Spur nicht zur Erklärung heranzog. Hoppe (2018) vermutet, dass die Beobachtung nicht in

Einklang mit der gewählten Erklärung gebracht werden konnte (ebd.). Eine fachlich korrekte Beschreibung der Beobachtung unter Verwendung des Energiebegriffs wurde von keiner*keinem Teilnehmenden vorgenommen (Hoppe, 2018).

Insgesamt sind nur wenige Untersuchungen bekannt, die über die Vorstellungen und Kenntnisse von Lernenden hinsichtlich IR-Strahlung, der IR-Kamera sowie IR-Bildmaterial berichten. Die hier zusammengefassten Untersuchungen zeigen eine grundsätzliche Bekanntheit von IR-Bildern bei Lernenden. Bei der **Interpretation von IR-Bildern gelingt** Lernenden die **Zuordnung von Farben zur Temperatur von Objekten**, wobei die Farbe Rot höheren, sowie Blau niedrigeren Temperaturen zugeordnet werden. **Verständnisschwierigkeiten** bei der Interpretation zeigen sich aufgrund der **dynamischen Farbanpassung** der Skala sowie thermischer Reflexionen.

In den Studien, die über den Einsatz von IR-Bildmaterial in Lehr-Lern-Prozessen berichten, zeigt sich, dass für eine geeignete Interpretation von IR-Bildern in Abhängigkeit des jeweiligen Kontextes eine **vorherige Theoriebildung erforderlich** ist. Verfügen Lernende nicht über geeignete oder über fehlerhafte Erklärungsmodelle, wie beispielsweise zur Wärmeleitung oder Reibung, gelingt eine Interpretation nicht. Es zeigt sich hier der Einfluss des domänenspezifischen Vorwissens auf das Verstehen von IR-Bildmaterial (vgl. Kapitel 3.3.2).

3.5 Die Infrarotkamera in Lehr-Lern-Prozessen

Repräsentationen, zu denen auch Bilder gehören, dienen in den Naturwissenschaften unter anderem der Wissensgewinnung sowie der Kommunikation und haben daher in Lehr-Lern-Kontexten eine immense Bedeutung; sie stellen eine „*Ressource für das Lernen*“ (Wernecke, 2017, S. 18) dar. Insbesondere im Zusammenhang mit dem abstrakten Energiekonzept konnte eine lernförderliche Wirkung von Repräsentationen festgestellt werden (für Arbeit-Energie-Balkendiagramme vgl. van Heuvelen & Zou, 2001). Im schulischen Kontext ergibt sich darüber hinaus aus den Vorgaben der landesweiten Bildungsstandards für das Fach Physik die Notwendigkeit der Auseinandersetzung mit Repräsentationen, da im Rahmen der Handlungsdimensionen unter der Kommunikationskompetenz das Verstehen von Abbildungen mit physikalischen Inhalt genannt wird (KMK, 2005, S. 10).

Zur Gestaltung eines Lernprozesses gehört demnach das zielgerichtete Auswählen von Repräsentationen, die das Verständnis für den Lerngegenstand unterstützen können.

Im Folgenden wird das Potenzial des Einsatzes der IR-Kamera sowie von IR-Bildmaterial in Lehr-Lern-Prozessen aus mediendidaktischer Sicht sowie aus fachdidaktischer Perspektive beleuchtet bevor exemplarische Einsatzgebiete im Physikunterricht vorgestellt werden.

3.5.1 Potenzial aus mediendidaktischer Sicht

Um die IR-Kamera in das Feld der Mediendidaktik einzuordnen, erscheint es notwendig, diese als *digitales Medium* zu definieren. Ein *Medium* ist ein vermittelndes Element zwischen einem Sender und einem Empfänger. Dabei kann die Informationsvermittlung z.B. durch Sprache, Schrift, Bild oder Video erfolgen. Das Adjektiv *digital* beschreibt in diesem Zusammenhang die Art der Vermittlung als eine Folge von Zahlen, die weiterverarbeitet werden. Nach dieser Definition ist die IR-Kamera ein visuelles, digitales Medium, das dem Beobachter Informationen über das Oberflächentemperaturprofil eines Experiments vermittelt. Die Informationsvermittlung erfolgt dabei durch ein falschfarbenes Bild (vgl. Kapitel 3.2).

Der Einsatz digitaler Medien im Unterricht ist oft mit hohen Erwartungen verbunden; sie werden häufig mit dem Ziel eingesetzt, den Lernerfolg zu steigern. Die Wirkung digitaler Medien wurde in verschiedenen Studien untersucht: Kerres (2003) fasste als übergeordnetes Ergebnis der Studien zusammen, dass der Lernerfolg nicht vom eingesetzten Medium abhängt, jedoch das Lernen mit digitalen Medien nicht schlechter als konventionelles Lernen abschneidet. Es gibt jedoch auch Variablen eines medienbasierten Lernangebots, die den Lernerfolg fördern können oder auch negativ beeinflussen. Dabei spielen die Akzeptanz der Medien bei den

beteiligten Personen eine bedeutende Rolle sowie die Fähigkeit selbst zu lernen. Akzeptanz kann durch verschiedene Schritte erreicht werden, z.B. durch die Einführung neuer Lernformen, durch das Einbeziehen der Teilnehmenden in die Entwicklung von Systemen und durch Unterstützung bei der Umsetzung. Alle Teilnehmenden müssen einen Mehrwert bei der Nutzung des Mediums wahrnehmen. Unter Selbstlernfähigkeit versteht Kerres (2003), dass die Lernenden besondere kognitive Fähigkeiten benötigen, um das Medium nutzen können. Dazu gehört unter anderem die Integration von Medieninhalten in die eigenen Wissensstrukturen (ebd.).

Bei der Konzeption einer medienbasierten Lernsituation ist neben diesen Variablen zu berücksichtigen, dass die Nutzung jedes Mediums zu einer bestimmten Art von Lernsituation führt. Dies lässt den Schluss zu, dass nicht das Medium selbst zu einer Steigerung des Lernerfolgs führt (Clark, 1994), sondern das zugrunde liegende mediale und didaktische Konzept (Kerres, 2003). Digitale Medien wie IR-Kameras können daher nicht als eigenständige Intervention losgelöst von Konzepten betrachtet werden, sondern als eine Technologie, die das Potenzial zur Innovation der Bildung hat. Daher sollte eine Leitfrage für den Einsatz von digitalen Medien wie der IR-Kamera innerhalb von Lehr-Lern-Prozessen sein, ob die IR-Kamera ein Bildungsproblem lösen kann (Kerres, 2003). Dies können beispielsweise Verständnisprobleme innerhalb des Energiekonzepts sein.

Das übergeordnete Ziel des Einsatzes der IR-Kamera in der vorliegenden Arbeit ist die visuelle Unterstützung des didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*. Damit adressiert der Einsatz des digitalen Mediums IR-Kamera ein Bildungsproblem im Zusammenhang mit dem Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung. Jedoch besteht die Herausforderung darin, dieses Potenzial tatsächlich im Unterricht einzulösen (für digitale Medien vgl. Kerres, 2003).

3.5.2 Didaktisches Potenzial in Lehr-Lern-Prozessen

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der IR-Kamera in Lehr-Lern-Prozessen sowie das Potenzial der IR-Kamera visuelle Evidenz für thermische Phänomene zu liefern wird sowohl von fachlicher als auch von fachdidaktischer Seite betont (Vollmer & Möllmann, 2010a; Xie, 2011).

Die IR-Kamera wird in naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Prozessen als ein Messinstrument eingesetzt, mit dem einem Experiment oder Phänomen zusätzliche visuelle Informationen hinzugefügt werden. Das Experiment ist aus mediendidaktischer Sicht ein Informationsträger, welches eine Mitteilungsfunktion übernimmt (Girwidz, 2009). Dabei ist die IR-Kamera ein

ergänzendes Element, das den Informationsgehalt des Experiments erhöht, indem die Beobachtungsmöglichkeiten für den Betrachtenden vom sichtbaren Spektralbereich in den Infrarotbereich erweitert werden (vgl. Kapitel 3.3). Folglich korrespondiert die Zielsetzung des Einsatzes der Kamera mit der didaktischen Zielsetzung des Experiments²⁴. Experimente können verschiedene didaktische Funktionen einnehmen wie beispielsweise die Unterstützung einer Begriffsbildung, die Entwicklung von Theorien, die Erforschung, Prüfung sowie Festigung von Theorien oder Wissen sowie das Anknüpfen an Schülervorstellungen (Girwidz, 2009; Reinhold, 1996).

Eine weit verbreitete Schülervorstellung ist beispielsweise, dass Metalle „kalt sind“, da sich diese bei Berührung kälter anfühlen als andere Materialien wie Holz oder Styropor gleicher Temperatur. Erickson (1979) äußert mit Bezug auf diese Vorstellung die Vermutung, dass die Schwierigkeiten überwunden werden könnten, wenn Lernende das Phänomen im Sinne eines Energietransfers von der Hand zum Metall *sehen* könnten. Dieser Gedanke dient häufig als Ansatz für entwickelte Experimente, in denen die IR-Kamera mit dem Ziel der Visualisierung der Wärmeleitung in Metallen eingesetzt wird (vgl. bspw. Haglund, Jeppsson et al., 2015; Xie, 2012b).

Ausgangspunkt des Einsatzes der IR-Kamera in Lehr-Lern-Prozessen kann somit das Adressieren von Schülervorstellungen sein. Folglich ist Ziel dieses Einsatzes der IR-Kamera an die Vorstellungen anzuknüpfen und den Schülerinnen und Schülern durch Visualisierung Evidenz für naturwissenschaftliche Konzepte zu liefern (Weichsel et al., 2008). Damit ein Konzeptwechsel von Alltagsvorstellungen zur wissenschaftlichen Vorstellung stattfinden kann, reicht nach Duit (1995) ein bloßes Verstehen der physikalischen Sichtweise nicht aus. Die Lernenden müssen von dieser Sichtweise *überzeugt* werden (ebd.). Inwiefern die IR-Kamera einen Beitrag zur Überzeugung leisten kann, bleibt zu prüfen.

3.5.3 Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht

Im Folgenden wird ein Überblick der Einsatzmöglichkeiten der IR-Kamera innerhalb der Sekundarstufe I gegeben, der exemplarischen Charakter aufweist und nicht als vollständig zu sehen ist. Aufgrund der Schwerpunktsetzung der Arbeit werden die Einsatzmöglichkeiten in

²⁴ Aber auch die Kamera beeinflusst das Experiment. Dieses muss so gewählt werden, dass es mittels IR-Kamera die gewünschten Beobachtungsmöglichkeiten liefern kann. Beispielsweise müssen für die Untersuchung von Konvektion oberhalb der Flamme einer Kerze mittels IR-Kamera dem Aufbau Elemente wie Papier oder Styropor hinzugefügt werden, die eine Beobachtung ermöglichen, da Luft auch für die IR-Kamera „unsichtbar“ ist.

der Hochschulphysik nicht beleuchtet (vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Hochschulphysik finden sich beispielsweise bei Möllmann & Vollmer, 2000; Vollmer et al., 2001).

Elektrizitätslehre

Weichsel et al. (2008) schlagen einen Einsatz von IR-Kameras im Rahmen der Elektrizitätslehre vor, um die Schülervorstellung des Stromverbrauchs zu adressieren (ebd., zu Schülervorstellungen in der Elektrik vgl. Rhöneck, 1986). Die Betrachtung eines elektrischen Stromkreises durch die IR-Kamera bietet gegenüber einer punktuellen Stromstärkemessung den Vorteil, dass mit der Kamera ein Gesamteindruck des Stromkreises erfasst werden kann (Weichsel et al., 2008). Da aufgrund des Widerstandes beim Stromfluss Dissipation auftritt und Wärme in die Umgebung übertragen wird, kann mittels IR-Kamera eine gleichmäßige Temperaturerhöhung der Drähte festgestellt werden (Weichsel et al., 2008). Die angezeigte Temperatur ist dabei ein Maß für die Stromstärke. Jedoch ist dieser Schluss nur für einen Stromkreis mit konstantem Widerstand zulässig²⁵ (Weichsel et al., 2008).

Werden Bauteilwiderstände in unverzweigten oder verzweigten Stromkreisen durch die IR-Kamera beobachtet, lässt sich anhand der nachweisbaren Temperaturerhöhung eine Aussage über die umgesetzte Leistung treffen. Die Visualisierung der unterschiedlichen Leistungen ist ebenfalls bei der Untersuchung von technischen Geräten wie Computern möglich, bei denen beispielsweise das Motherboard die größte Temperatur aufweist (Nordmeier et al., 2008). Ebenfalls lässt sich die Gefahr von Kurzschlüssen durch einen großen Temperaturanstieg visualisieren (Weichsel et al., 2008).

Konduktion und Konvektion

Aus fachdidaktischer Forschung ist bekannt, dass Lernende Schwierigkeiten bei der Konzeptualisierung thermischer Phänomene wie Konduktion bzw. Konvektion haben (vgl. Kapitel 2.4.1.2). Mittels IR-Kamera kann eine Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien stattfinden. Beispielsweise lässt sich bei der Berührung von Metall mit dem Finger eine Temperaturerhöhung beobachten, die sich oberhalb des Fingers fortsetzt, während bei anderen Materialien wie Holz oder Schaumstoff ausschließlich die Berührungsfläche eine Temperaturerhöhung aufweist (Haglund, Hedberg et al., 2015; Xie, 2012b).

²⁵ Weichsel, Strahl und Müller (2008) führen aus, warum und unter welchen Annahmen ein Rückschluss von der Temperatur auf die Stromstärke zulässig ist.

Mit der IR-Kamera lässt sich ebenfalls eine Temperaturerhöhung in Folge von Konduktion zwischen heißem Wasser und einer Tasse feststellen: Nach dem Befüllen einer keramischen Tasse mit heißem Wasser, wird zunächst durch Konduktion Energie vom Tee auf die Tasse übertragen, was eine Temperaturerhöhung der Tasse und eine Temperaturabnahme des Tees zur Folge hat (Xie, 2012b). Ebenfalls findet eine Wärmeübertragung von der Tasse zum Tisch statt. Im IR-Bild kann der Prozess der Temperaturerhöhung von Tasse und Tisches beobachtet werden (Dexter, Chiesa & Xie, 2012).

Darüber hinaus findet aufgrund des Temperaturunterschieds zwischen Teewasser bzw. Teetasse und Umgebungsluft eine Energieübertragung durch Konvektion statt. An der Kontaktfläche zwischen Tee bzw. Becher und Umgebungsluft erfolgt ein Temperatenausgleich (Dexter et al., 2012). Beim Teewasser hat die Temperaturabnahme eine Erhöhung der Dichte des Teewassers gegenüber dem darunter liegenden Wasser höherer Temperatur zur Folge; das kühlere Wasser mit der höheren Dichte sinkt in der Tasse herab. Auch die Temperaturerhöhung der Luft hat eine Änderung der Dichte zur Folge; die temperaturerhöhte Luft steigt nach oben. Da Luft aber sowohl für das menschliche Auge als auch für die IR-Kamera unsichtbar ist, lässt sich der Konvektionsstrom durch die IR-Kamera nicht unmittelbar beobachten. Jedoch kann mit einem Papierstreifen, der dicht über das heiße Wasser gehalten wird, mittels IR-Kamera eine Temperaturerhöhung des Papiers festgestellt werden (Xie, 2012b). Ähnlich kann mit Styropor eine fortschreitende Temperaturerhöhung in Folge von Konvektion über einer Flamme dargestellt werden (Dexter et al., 2012; Xie, 2012b). Diese Experimente gewähren Lernenden eine Einsicht in die Vorgänge der Wärmeübertragung.

Wird Teewasser in eine Isolierkanne gegossen, findet aufgrund des nahezu luftleeren Raumes zwischen den Flaschenwänden keine bzw. nur wenig Konvektion oder Konduktion statt. Durch die isolierende Wirkung bleibt die Temperatur des Wassers über einen gewissen Zeitraum annähernd konstant. Ein IR-Bild zeigt hauptsächlich am Plastikdeckel der Isolierkanne eine nachweisbare Temperaturerhöhung (Köhn, 2019; vgl. Abbildung 41). Trotzdem kühlt der Tee auch in einer Isolierkanne ab, da eine Wärmeübertragung über die vom Teewasser ausgesendete elektromagnetische Strahlung erfolgt, für die kein Medium notwendig ist (Halliday et al., 2005; Meschede, 2002).

Optik

Im Bereich der Strahlungsphysik kann mittels IR-Kamera das Verhalten von IR-Strahlung gegenüber sichtbarer Strahlung an Grenzflächen untersucht werden (Nordmeier et al., 2008).

Beispielweise kann ein Luftballon von sichtbarer Strahlung aufgrund der Frequenzabhängigkeit von Materialien nicht durchdrungen werden, während IR-Strahlung transmittiert wird (Melander, Haglund, Weiszflog & Andersson, 2016; Nordmeier et al., 2008).

Im naturwissenschaftlichen Unterricht sind Repräsentationen von großer Bedeutung, da sie dem Erwerb und der Kommunikation von Wissen dienen. Zur Gestaltung eines Lernprozesses gehört demnach das zielgerichtete Auswählen von Repräsentationen, die das Verständnis für den Lerngegenstand unterstützen können.

Der Einsatz von IR-Kameras bzw. IR-Bildmaterial hat das Ziel, Experimente und Phänomene mit zusätzlichen Informationen anzureichern und so zu einem besseren Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte beizutragen. **Somit hat die IR-Kamera das Potenzial, Lernprozesse zu verändern** (Xie, 2012b). Darüber hinaus könnte die Visualisierung von ansonsten unsichtbaren Vorgängen Lernende von diesen **Konzepten überzeugen** und somit einen Konzeptwechsel bzw. Konzeptaufbau unterstützen (vgl. Kapitel 2.4.1).

Daher werden IR-Kameras als nützliche Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht gesehen, mit denen in unterschiedlichen Themengebieten Phänomene visualisiert werden können (Short, 2012). Ihr **Einsatz als erweitertes Auge bietet sich in allen Lernkontexten an, in denen das Sichtbarmachen von thermischen Prozessen zum Erkenntnisgewinn beitragen kann**. Zu diesen zählen in der Physik neben der Thermodynamik ebenfalls die Themenbereiche Elektrik, Magnetismus, Optik (Strahlungsphysik) und Energie (Vollmer et al., 2001). Dabei nimmt **Energie** eine Sonderrolle ein, da aufgrund der Eigenschaften der IR-Technik grundsätzlich Wärmeübertragung in Form von IR-Strahlung detektiert wird und somit der Energietransfer je nach Themengebiet gedeutet werden muss.

3.6 Die Infrarotkamera als mediale Unterstützung des didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*

Die Entwicklung eines umfassenden und elaborierten Energieverständnisses erfordert ein Verständnis der Aspekte Energieformen, Energieumwandlung, Energietransfer, Energieentwertung und Energieerhaltung (vgl. Kapitel 2.2). Während die Verständnisenwicklung im Bereich von Energieformen, Energieumwandlung und Energietransfer für Lernende weniger herausfordernd scheint, erweist sich die Entwicklung eines Verständnisses für Energieentwertung sowie Energieerhaltung als ungleich schwerer (vgl. Kapitel 2.4.2). Im Gegensatz zu vielen anderen physikalischen Phänomenen, wie beispielsweise Beschleunigungsvorgänge in der Dynamik, ist die Energieerhaltung im Alltag schwer wahrzunehmen: Jeder rollende Ball stoppt nach wenigen Metern scheinbar von selbst und ein Fahrrad hält seine Geschwindigkeit nur, wenn in die Pedale getreten wird. Mit diesen Phänomenen geht aufgrund von Dissipation eine Temperaturerhöhung einher. Diese bleibt jedoch meist unbemerkt und ist zudem mit herkömmlichen Thermometern nur schwer beobachtbar. Daane et al. (2015) stellen heraus, dass Schwierigkeiten bei der Beschreibung der Energieumwandlung bei Szenarien wie dem rollenden Ball mit der fehlenden Wahrnehmbarkeit der Temperatur(-erhöhung) für die innere Energie einhergehen. IR-Kameras bieten die Möglichkeit, diese Herausforderungen beim Lehren und Lernen des Energiekonzepts zu adressieren, indem sie "*das Unsichtbare sichtbar machen*" (Haglund, Jeppsson et al., 2015, S. 2).

Bei allen Umwandlungs- und Übertragungsprozessen wird ein Teil der Energie durch Reibung in innere Energie umgewandelt sowie Energie in die Umgebung übertragen. Die der Umgebung zugeführte Energie führt dort zur Erhöhung der inneren Energie und wird durch Wärmetransport auf einen immer größeren Raum verteilt (vgl. Kapitel 2.1). Dieser Vorgang wird in der Fachdidaktik als Energieentwertung bezeichnet. Mit diesem Vorgang geht eine Temperaturerhöhung der Reibungspartner bzw. der Umgebung einher. In der Regel bleibt dieser Prozess der Temperaturerhöhung Lernenden verborgen.

Wird der rollende Ball jedoch durch die IR-Kamera beobachtet, ist eine Temperaturerhöhung von Ball und Boden zu erkennen. Damit ist ein Indikator für die innere Energie, die Temperatur, mittels IR-Kamera beobachtbar. Zeitgleich ist die Abnahme der Geschwindigkeit des Balles zu sehen. Daraus kann auf eine Umwandlung von Bewegungsenergie in innere Energie sowie auf einen Energietransfer vom Ball zum Boden geschlossen werden.

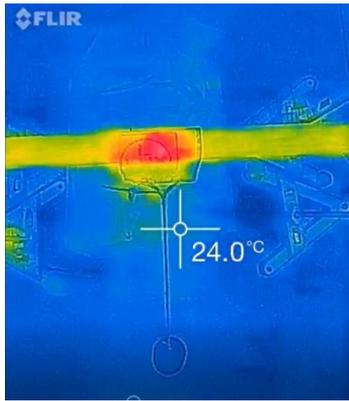


Abbildung 11: Infrarotbild eines Pendels von oben. Der Pendelkörper ist mit einem Seil an einer Holzstange befestigt.

Ein weiteres Beispiel ist ein schwingendes Pendel (vgl. Kapitel 2.2), bei dem sich eine Abnahme der Amplitude sowie der Geschwindigkeit des Pendelkörpers direkt beobachten lassen (Kröger, 2012; Nordmeier et al., 2008). Hieraus kann gefolgert werden, dass die Pendelenergie abnimmt. Mit Hilfe der IR-Kamera können die Lernenden auf die Suche nach der fehlenden Energie gehen (Greinert & Weßnigk, 2017). Das Infrarotbild des Pendels zeigt eine Temperaturerhöhung an der Aufhängung, woraus auf eine Zunahme der inneren Energie der Aufhängung und somit auf einen Energietransfer vom Pendel zur Aufhängung geschlossen

werden kann (vgl. Abbildung 11).

Mit dem Ziel, die Temperaturerhöhung bei dissipativen Prozessen mittels IR-Kamera sichtbar zu machen, wurde eine Vielzahl an Experimenten entwickelt. Dabei handelt es sich um das Herabfallen einer Stahlkugel aus verschiedenen Höhen (Haglund, Jeppsson et al., 2015; Kröger, 2012; Nordmeier et al., 2008), herabgleitende Klötze auf einer schiefen Ebene, die Bremsen bzw. die Kette eines Fahrrads, Mixen von Honig mit einem Handrührgerät oder der Vergleich von Energiesparlampen mit Glühdraht-Lampen (Kriks, 2016; Kröger, 2012). Ebenfalls lassen sich im Zusammenhang mit Dissipation Stromkreise betrachten (Weichsel et al., 2008). Durch das Sichtbarmachen der zuvor unsichtbaren (und oft auch nicht spürbaren) Temperaturerhöhungen haben IR-Kameras das Potenzial, visuelle Evidenz für den Energietransfer im Rahmen von Entwertungsprozessen zu liefern.

Jedoch ist zum einen die Deutung von IR-Bildern in Bezug auf die Temperatur und zum anderen die Interpretation im Hinblick auf einen Energietransfer im Rahmen von Entwertungsprozessen nicht selbsterklärend und ersetzt keine Theoriebildung (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4.3).

Die IR-Bilder zeigen zunächst nur ein falschfarbenedes Bild des Beobachtungsbereichs, sie machen weder Temperatur noch Energie direkt sichtbar. Daher muss der tatsächliche Aussagewert des IR-Bildes für den Betrachter beim Einsatz der IR-Kamera innerhalb eines Lernprozesses berücksichtigt werden.

3.6.1 Aussagewert von Infrarotbildmaterial

In Kapitel 3.3.2 wurde anhand eines statischen Beispiels geringer Komplexität ein Modell des Bildverstehens vorgestellt. Innerhalb des didaktischen Konzeptes *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* wird die Kamera jedoch auch zur Echtzeit-Visualisierung von thermischen Prozessen bei dynamischen Vorgängen verwendet oder es werden IR-Videos betrachtet. Es ist anzunehmen, dass die Verarbeitung von (Echtzeit-)Videos aufgrund ihrer strukturellen Ähnlichkeit zu statischen Bildern hierzu analog verläuft (Hartig, 2014).

Durch die fortlaufende Veränderung nimmt jedoch die Komplexität des IR-Bildmaterials zu, da dieses eine größere Menge an Informationen enthält, die verarbeitet und verstanden werden müssen. Dies soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden.

Im Rahmen der Einführung von Energieentwertungsprozessen werden die Lernenden aufgefordert das Herabfahren eines Wagens auf einer Rampe mit dem Herabrutschen des Wagens auf dem Wagendach zu vergleichen. In einem nächsten Schritt sollen die Lernenden den Rutschvorgang durch die IR-Kamera beobachten. Abbildung 12 (links) zeigt das Realexperiment, während Abbildung 12 (rechts) das IR-Bild des Wagens mit einem Teil der Rampe kurz vor Ende des Rutschvorganges zeigt. Die Lernenden beobachten diesen Vorgang jedoch in Echtzeit, sodass sich ein dynamisch veränderliches IR-Video ergibt.

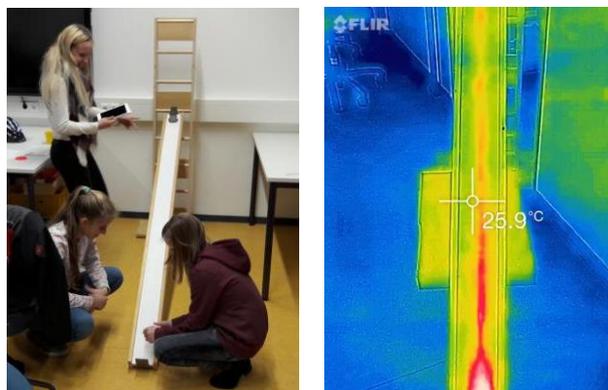


Abbildung 12: Ein Block gleitet eine Rampe herunter (links). Rechts ist das IR-Bild am Ende des Rutschvorgangs zu sehen.

Der erste Schritt für die Lernenden besteht darin, den für diesen Kontext relevanten Teil des Vorgangs zu identifizieren: die Rampe mit dem Block. Dieser muss während des gesamten Rutschvorgangs betrachtet werden. Was können die Lernenden mittels der IR-Kamera tatsächlich *sehen*? Auf dem IR-Bild hat die Rampe die Farbe Grün, die Spur, auf der der Wagen die Rampe herabgeglitten ist, nimmt die Farbe Rot an. Dies gilt ebenso für den Block, der zum Ende des Vorgangs sogar eine weiße Färbung angenommen hat. Die tatsächlich sichtbare Farbcodierung muss in einem nächsten Schritt mit der Temperatur verknüpft werden (vgl.

Kapitel 3.3.2). Die Forschung zeigt, dass je mehr Erfahrung die Lernenden mit IR-Bildern haben, desto einfacher ist es für sie, Rückschlüsse auf die Temperatur zu ziehen, sodass Farben im Laufe der Zeit direkt mit Temperaturanstiegen oder -abnahmen in Verbindung gebracht werden können. Dies kommt dem *Sehen* von Temperaturschwankungen sehr nahe (vgl. Kapitel 3.4.2).

Das visuelle Argument des Bildes ist jedoch nicht direkt zu sehen: die Umwandlung von Bewegungsenergie in innere Energie und die Übertragung von Energie auf die Rampe.

Um den beobachteten Prozess mit Energieentwertung in Verbindung zu bringen, sind die Informationen über die Temperaturänderungen unzureichend; die Lernenden müssen zusätzlich auch Informationen durch Beobachtungen heranziehen, die sie ohne IR-Kamera machen konnten: Der rutschende Wagen erreicht eine geringere Geschwindigkeit als der fahrende Wagen.

Zum Verstehen der IR-Echtzeitbeobachtung sind nun diverse Verarbeitungsschritte notwendig. Die Temperaturerhöhung muss in Zusammenhang mit der Beobachtung der Abnahme der Geschwindigkeit des Wagens gebracht werden. Darüber hinaus muss die Temperatur als Indikator für die innere Energie sowie die Geschwindigkeit als Indikator für Bewegungsenergie identifiziert und auf einen Umwandlungsprozess geschlossen werden. In einem nächsten Schritt müssen die Lernenden aus der Beobachtung der Temperaturerhöhung der Rampe auf eine Energieübertragung vom System Wagen zum System Rampe folgern. Außerdem ist im oberen Teil der Rampe bereits ein Verblässen der roten Spur im IR-Bild zu erkennen, was auf einen Temperaturabfall hindeutet. Über die IR-Kamera ist jedoch nicht erkennbar, dass dies durch Dispersion verursacht wird.

Um zu diesen Schlussfolgerungen zu gelangen, müssen die Lernenden demnach zusätzliche Informationen heranziehen und bereits mit den Vorgängen bei Energieentwertungsprozessen vertraut sein. Demzufolge kann einem IR-Bild erst die Bedeutung als Evidenz für Energieentwertung zugeordnet werden, wenn ein Rückgriff auf ein entsprechendes mentales Modell möglich ist (vgl. Kapitel 3.3.2).

Doch auch wenn Lernende über entsprechendes Vorwissen verfügen, können wichtige Elemente des IR-Bildes von den Lernenden nicht oder falsch wahrgenommen werden. Es ist möglich, dass diese das IR-Bild nicht zielgerichtet im Hinblick auf ein physikalisches Konzept betrachten, welches mit dem IR-Bild verdeutlicht werden sollte (vgl. Kapitel 3.4.3). Infolgedessen wird dem IR-Bild nicht die Bedeutung als Evidenz für dieses Konzept zugeordnet. Um mit

diesen Herausforderungen umzugehen, können Lehrende beim Einsatz von IR-Kameras innerhalb von Lehr-Lern-Prozessen die Lernenden beim Verstehen von IR-Bildmaterial unterstützen, indem sie die Aufmerksamkeit auf wichtige Bildelemente wie beispielweise den Block und die Spur lenken und diese gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern als Energieentwertung interpretieren (vgl. zur Unterstützung beim Bildverstehen Girwidz, 2009).

Zur Unterstützung der Lernenden beim Bildverstehen wurde in der vorliegenden Arbeit die IR-Kamera FlirOne verwendet, da diese durch die MSX-Technik das natürliche Bildverstehen erleichtern kann (vgl. Kapitel 3.3.2). Zudem hat diese Technik für das indikatorische Bildverstehen den Vorteil, dass die Lernenden die Temperaturerhöhungen einfacher den Elementen des Realexperiments zuordnen und mit Energietransfer von einem „Objekt“ bzw. System zum anderen in Verbindung bringen können. Diese Möglichkeit der „Lokalisierung der Energie“ kann ebenfalls Anknüpfungspunkte für die Herausforderungen beim Lernen von Energieerhaltung bieten: Solomon (1985) beobachtete, dass Lernende den Energieerhaltungssatz dahingehend fehlinterpretieren, dass sie einen Verbleib der Energie im System annahmen (vgl. Kapitel 2.4.2)

Das in Kapitel 2.6 vorgestellte didaktische Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* legt bei Umwandlungs- und Übertragungsprozessen den Fokus auf den stattfindenden Energiestrom in die Umgebung. Jedoch sind dieser Transfer und die Folge der Temperaturerhöhung nur schwer durch traditionelle Messinstrumente wie Thermometer beobachtbar. Dies gelingt mit einer IR-Kamera. Mit ihr lässt sich das Oberflächentemperaturprofil visualisieren, sodass ein Indikator für die innere Energie direkt beobachtet werden kann und Lernende anhand der Temperatur auf die innere Energie schließen können. Demnach ist der zentrale Gedanke beim Nutzen der IR-Kamera, dass diese für Schülerinnen und Schüler eine **visuelle Evidenz für den stattfindenden Energietransfer bei dissipativen Prozessen liefern kann**.

Jedoch weisen die mit der IR-Kamera aufgenommenen Bilder und Videos durch Komplexität und Dynamik eine **hohe Komplexität auf, die das Bildverstehen erschwert**. Für eine Interpretation der Aufnahmen als Evidenz für Energietransfer müssen die Lernenden bereits mit dem Konzept der **Energieentwertungsprozessen vertraut sein**. Unterstützung bietet die in der vorliegenden Arbeit verwendete IR-Kamera FlirOne durch das Einfügen von Objektrissen. Zusätzlich sollte die **Aufmerksamkeit gezielt** auf wichtige Bildelemente **gelenkt werden**.

4 Desiderat: Das Projekt „Energieentwertung erfassbar machen“

Anhand der curricularen Vorgaben wird deutlich, dass Schülerinnen und Schüler bereits in der Mittelstufe über ein grundlegendes Verständnis von Energieentwertung und -erhaltung verfügen sollen (vgl. Kapitel 2.3). Die Forschung zeigt jedoch, dass die Forderung gerade im Hinblick auf diese Aspekte nicht eingehalten werden kann (vgl. Kapitel 2.4). Um den Herausforderungen beim Erlernen des Energiekonzepts zu begegnen, werden Lösungsansätze benötigt, die Lernende beim Aufbau eines angemessenen Energieverständnisses, das die Aspekte Entwertung und Erhaltung miteinschließt, unterstützen. Das in Kapitel 2.6 vorgestellte didaktische Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* bietet einen solchen Ansatz, bei dem Entwertungsprozesse in den Fokus der Betrachtung gerückt werden.

Entwertungsprozesse gehen jedoch mit der Problematik einher, dass ihre Auswirkungen, insbesondere die damit einhergehende Temperaturerhöhung, nur unzureichend beobachtet werden können. Gerade dieser fehlende Indikator trägt wesentlich zu den Verständnisschwierigkeiten im Rahmen von Energieentwertungsprozessen bei (Daane et al., 2015). Hier kann eine IR-Kamera helfen. Die physikdidaktische Forschung hat das Potenzial von IR-Kameras erkannt (vgl. Kapitel 3.5.2); mit ihr lassen sich Temperaturerhöhungen im Rahmen dissipativer Prozesse wahrnehmen, die als Indikator für die Umwandlung von Energie in innere Energie herangezogen werden können (Haglund, Hedberg et al., 2015). In diesem Zusammenhang wurden speziell für den Einsatz der IR-Kamera eine Reihe von Experimenten entwickelt (vgl. Kapitel 3.5.3). Mit dem Einsatz von IR-Kameras in Lehr-Lern-Prozessen sind große Erwartungen verbunden, was durch Formulierungen wie „Unsichtbares sichtbar machen“ oder „IR Kameras liefern klare Evidenz für Energieentwertung“ deutlich wird. Ob diese Erwartungen jedoch auch eingelöst werden können, wurde bisher nur in wenigen Studien und in geringer Stichprobe ($N \leq 5$) untersucht (vgl. Kapitel 3.4).

Im Rahmen des Projekts *Energieentwertung erfassbar machen* hat erstmals eine Untersuchung des Einflusses der IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung innerhalb eines Lehrgangs stattgefunden (Nordine & Weißnigk, 2016).

Ziel des Projekts *Energieentwertung erfassbar machen* ist es, die Lernenden bei der Verständnisenwicklung im Bereich von Energieentwertung geeignet zu unterstützen, indem einerseits das didaktische Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* in einem Lehrgang

umgesetzt wird und andererseits innerhalb dieses Lehrgangs eine Visualisierung der Vorgänge durch die IR-Kamera stattfindet.

Aus dieser Zielsetzung folgt als übergeordnete Forschungsfrage des Projekts:

Inwiefern verbessert der Lehrgang mit Fokus auf Energietransfer bei dissipativen Prozessen unter Visualisierung der Vorgänge mittels IR-Kamera das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung?

Die Untersuchung dieser Fragestellung erfolgt im Projekt durch insgesamt vier Studien in informeller und formeller Lernumgebung, wobei das vorliegende Dissertationsprojekt die Studien EmIR und EmIR+ umfasst (vgl. Abbildung 13).

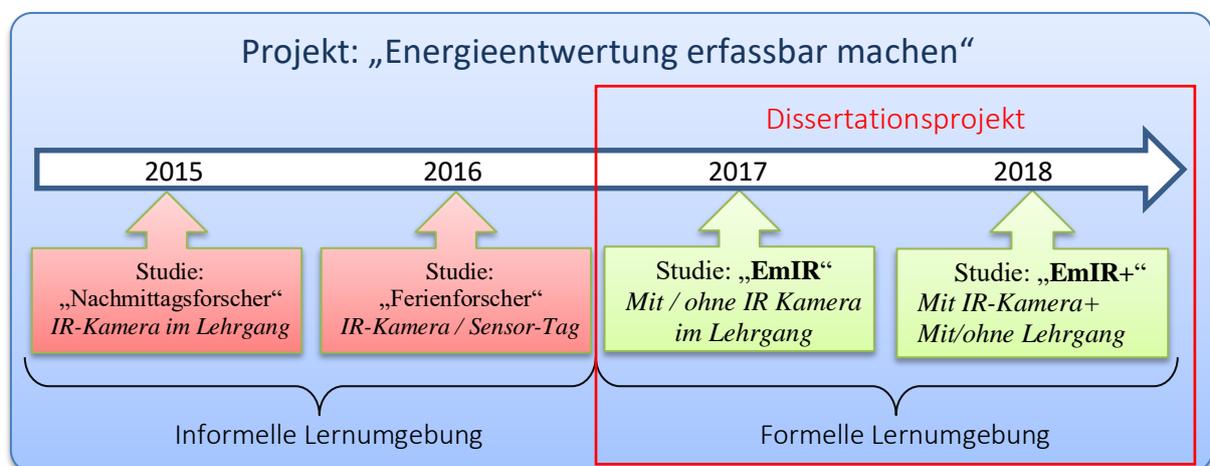


Abbildung 13: Darstellung des Forschungsprojekts "Energieentwertung erfassbar machen".

Die Studien *Nachmittagsforscher* und *Ferienforscher* haben bereits in informeller Lernumgebung stattgefunden. Der in diesem Rahmen entwickelte Lehrgang umfasst Aktivitäten, die aus dem Investigating and Questioning our World through Science and Technology (IQWST) Curriculum adaptiert wurden. Innerhalb des Lehrgangs erwerben die Lernenden grundlegende Kenntnisse über Energieformen, Energieumwandlung und Energieentwertung und führen in diesem Zusammenhang verschiedene Experimente unter Verwendung der IR-Kamera durch (Nordine & Weißnigk, 2016; Weißnigk & Nordine, 2017). Dabei handelt es sich beispielsweise um das Mischen von Wasser unterschiedlicher Temperatur sowie um einen Vergleich eines fahrenden mit einem rutschenden Wagen auf einer schiefen Ebene (vgl. Kapitel 3.6).

In der Studie *Nachmittagsforscher* wurde der Lehrgang im außerschulischen Lernort „EnergieLabor“ der Kieler Forschungswerkstatt mit Schülerinnen und Schülern (N = 6) der 6.-8. Jahrgangsstufe in je zwei Stunden an vier Nachmittagen durchgeführt. Die Datenerhebung erfolgte im Pretest-Posttest-Design mittels halbstrukturierter Interviews, die hinsichtlich der

erreichten Komplexität im Verständnis der Konzepte der Energiequadriga codiert wurden (K. Neumann et al., 2013; vgl. Kapitel 2.5). Die Ergebnisse der Studie zeigen eine substantielle Verbesserung des Verständnisses im Bereich der Energieentwertung (Weßnigk & Nordine, 2017).

Diese Ergebnisse konnten ebenfalls in der Folgestudie *Ferienforscher* (N = 21) mit ähnlichem Design bestätigt werden (vgl. für eine Subgruppe Fehlow, 2016).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Vorstudien, dass der für die informelle Lernumgebung entwickelte Lehrgang mit medialer Stützung durch die IR-Kamera zu einer substantiellen Verbesserung des Verständnisses für Energieentwertung führt.

Da in den Vorstudien stets der *Lehrgang mit visueller Stützung mittels IR-Kamera* durchgeführt wurde, lässt sich anhand dieser Untersuchungen jedoch keine Aussage darüber treffen, inwiefern der **Lehrgang** nach dem didaktischen Konzept zu einer Steigerung im Verständnis für Energieentwertung führt und welchen Einfluss die **IR-Kamera** auf den Lernerfolg hat.

Für eine differenziertere Aussage scheint eine weiterführende Untersuchung notwendig, die sowohl den Einfluss der IR-Kamera innerhalb des Lehrgangs als auch den Einfluss des Lehrgangs selbst in den Fokus nimmt.

Aus diesen Überlegungen lassen sich die im weiteren vorgestellten Forschungsfragen konkretisieren, die den Ausgangspunkt der weiteren Untersuchungsplanung bilden.

Da die in den Vorstudien belegte Verbesserung des Verständnisses für Energieentwertung ebenfalls für die schulische Bildung bedeutsam²⁶ sein kann, wird im Rahmen dieser Arbeit eine curricular orientierte Entwicklung eines Lehrgangs für den Einsatz Schule vorgenommen.

²⁶ Die Anschaffungskosten von IR-Kameras belaufen sich mittlerweile auf 200-300€ und liegen somit im Standardrahmen der Kosten für schulisches Experimentiermaterial. Darüber hinaus ist der Einfluss von Lehrgängen auf die Verständnisentwicklung, insbesondere für das Energiekonzept, aus fachdidaktischer Forschung bekannt (Weßnigk & Neumann, 2015; Weßnigk & Nordine, 2017; vgl. Kapitel 2.5).

4.1 Forschungsfragen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist einerseits die Untersuchung der Lernförderlichkeit eines **Lehrgangs** nach dem didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* auf das Verständnis für Entwertung und Erhaltung.

Andererseits soll der Einfluss des Einsatzes der **IR-Kamera** als visuelle Unterstützung für Entwertungsprozesse im Rahmen dieses Konzepts untersucht werden, wenn

- die IR-Kamera lediglich als zusätzliches Messinstrument beim Experimentieren eingesetzt wird.
- eine mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang erfolgt (vgl. Abbildung 14).

Ergebnisse Vorstudie: Der Lehrgang mit Visualisierung mittels IR-Kamera führt in informeller Lernumgebung bei kleiner Stichprobe zu einer Steigerung im Verständnis für Entwertung.

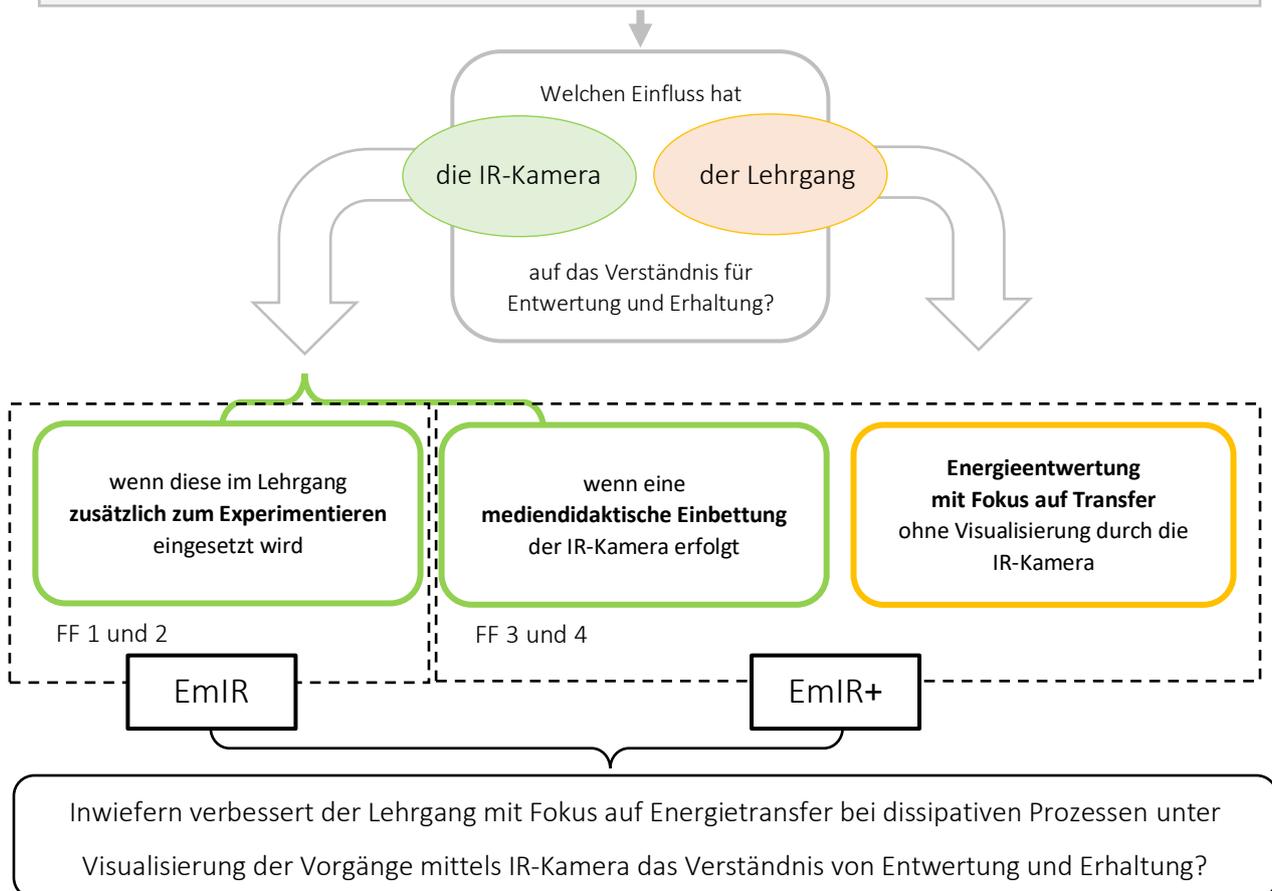


Abbildung 14: Flussdiagramm der Untersuchungsschwerpunkte.

Im Einzelnen werden folgende Forschungsfragen untersucht:

1. Inwiefern

- a) kann die in informeller Lernumgebung beobachtete Steigerung im Verständnis für **Energieentwertung** durch den **Lehrgang mit Visualisierung mittels IR-Kamera** in formeller Lernumgebung reproduziert werden?
- b) gelingt mit diesem **Einsatz der IR-Kamera im Lehrgang** eine „Anbahnung“ eines Verständnisses für **Energieerhaltung**?

2. Inwiefern führt der zusätzliche **Einsatz der IR-Kamera im Lehrgang** zu einer Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung und -erhaltung **gegenüber dem Lehrgang** ohne Visualisierung mittels die IR-Kamera?

EmIR

3. Inwiefern

- a) führt der **Lehrgang** nach dem didaktischen Konzept Energieentwertung mit Fokus auf Transfer (ohne Einsatz der IR-Kamera) **gegenüber traditionellem Energieunterricht** zu einer Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung?
- b) gelingt durch den **Lehrgang** eine Anbahnung des Verständnisses für Energieerhaltung **gegenüber dem traditionellen Energieunterricht**?

4. Inwiefern

- a) gelingt durch die „**mediendidaktische Einbettung**“ der **IR-Kamera** in den entwickelten Lehrgang eine Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung **gegenüber der Lehrgangsguppe** ohne Einsatz der IR-Kamera?
- b) gelingt durch diese **mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera** in den Lehrgang eine Anbahnung des Verständnisses für Energieerhaltung **gegenüber der Lehrgangsguppe** ohne Einsatz der IR-Kamera?

EmIR+

Inwiefern verbessert der Lehrgang mit Fokus auf Energietransfer bei dissipativen Prozessen unter Visualisierung der Vorgänge mittels IR-Kamera das Verständnis für Entwertung und Erhaltung?

übergeordnete Forschungsfrage

Bei der Formulierung der Forschungsfragen wurden die Begriffe „*Verständnis*“, „*Anbahnung*“, „*traditionell*“ sowie „*Abstimmung*“ verwendet, die zwecks der Eindeutigkeit der Forschungsfragen einer weiteren Erläuterung bedürfen:

Mit dem „**Verständnis**“ für Energieentwertung und -erhaltung ist in der vorliegenden Arbeit gemeint, dass die Schülerinnen und Schüler Phänomene unter Berücksichtigung dieser Aspekte beschreiben und erklären sowie zur Problemlösung heranziehen können.

Der Aspekt der Energieerhaltung stellt Lernende vor eine große Herausforderung, da der Mengenerhalt bei realen Phänomenen aufgrund von Transfervorgängen in und aus dem System nicht wahrnehmbar ist (Fortus, 2016). Daher sollte Energieerhaltung in den unteren Jahrgängen nicht explizit eingeführt werden, sondern zunächst eine Betrachtung von Energieformen, Energieumwandlung und -transfer erfolgen. Auf diesen Erfahrungen basierend kann mit der Zeit ein Verständnis für Energieerhaltung aufgebaut werden (Fortus, 2016, S. 122, siehe auch NGSS Lead States, 2013). Unter „**Anbahnung**“ wird hier eine solche Begriffsbildung über die genannten Aspekte mit der Zeit verstanden.

Der Begriff „**traditionell**“ wird verwendet, um den an Schulen häufig praktizierten Unterricht zu beschreiben. Beispielsweise spricht Nordine (2016) von der „*traditional energy instruction*“. Jedoch gibt Duit (2014) zu bedenken, dass es beim Unterrichten des Energiekonzepts unterschiedliche Zugänge gibt. Um den Begriff *traditionell* zu spezifizieren, ist daher eine Darstellung der Ziele und Inhalte dieses traditionellen Vergleichsunterrichts notwendig, welche in Kapitel 8.4.3 vorgenommen wird.

Eine „**mediendidaktische Einbettung**“ eines Mediums in den Lehr-Lernprozess ist immer von der jeweiligen Technologie bzw. dem Medium abhängig und kann daher nicht allgemein gefasst werden (Kerres, 2003). In diesem Fall ist mit der Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang eine Abstimmung des Lehrgangs im Sinne einer methodischen Aufbereitung des IR-Bildmaterials gemeint. Beispielsweise können in diesem Rahmen Schülervorstellungen sowie die Lernschwierigkeiten, die sich bei der Interpretation von IR-Bildmaterial zeigen, berücksichtigt werden. Die umgesetzten Maßnahmen werden Kapitel 8.3 vorgestellt.

Es erfolgt im Rahmen der Forschungsfragen zwar eine Unterscheidung zwischen dem Einsatz der IR-Kamera als zusätzliches Messinstrument sowie einer mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera in den Lehr-Lernprozess, jedoch ist ein Vergleich dieser beiden Gruppen nicht Teil der Untersuchung. Mit dem Ziel des Projekts, Lernende bei der Entwicklung eines Verständnisses für Energieentwertung und -erhaltung zu unterstützen, ergibt sich eine starke

Praxisorientierung. Ein Einsatz der IR-Kamera ohne weitere Thematisierung des IR-Bildmaterials ist zwar forschungsmethodisch für eine Kontrolle der Lerngelegenheiten unbedingt notwendig, aus Praxisperspektive handelt es sich bei einem solchen Einsatz jedoch um eine Lernumgebung, die wenig Bezug zur Unterrichtsrealität hat.

4.2 Forschungshypothesen

Auf Basis der in Kapitel 2 und 3 dargestellten theoretischen Grundlagen werden folgende Hypothesen aufgestellt:

H1: Der weiterentwickelte Lehrgang mit Visualisierung durch die IR-Kamera in formeller Lernumgebung repliziert die Ergebnisse bzgl. Energieentwertung aus informeller Lernumgebung. Durch das didaktische Konzept des Lehrgangs und die Visualisierung durch die IR-Kamera wird eine Anbahnung im Verständnis von Energieerhaltung angenommen, obwohl keine explizierte Thematisierung des Energieerhaltungssatzes im Sinne von „Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden“ stattfindet.

H2: Den theoretischen Überlegungen zur Nutzung der IR-Kamera folgend, wird bereits durch den Einsatz der IR-Kamera als zusätzliches Messinstrument ein gesteigertes Verständnis für Entwertung und Erhaltung gegenüber dem Lehrgang ohne Kamera erwartet, da diese visuelle Evidenz für den Energietransfer bei Energieentwertungsprozessen liefern kann.

H3: Durch das didaktische Konzept des Lehrgangs, welches Anknüpfungspunkte an die von Verbrauch geprägten Alltagserfahrungen der Lernenden bietet, wird ein gesteigertes Verständnis hinsichtlich Energieentwertung gegenüber dem traditionellen Energieunterricht erwartet. Darüber hinaus wird durch den gewählten Fokus auf Energietransfer bei Entwertungsprozessen ein gesteigertes Verständnis für Energieerhaltung im Sinne eines Mengenerhalts angenommen.

H4: Den theoretischen Überlegungen zur Nutzung der IR-Kamera folgend wird durch die mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang ein gesteigertes Verständnis für Entwertung und Erhaltung gegenüber dem Lehrgang ohne IR-Kamera erwartet. Ziel der Abstimmung des Lehr-Lern-Prozesses ist die Bedeutungszuweisung des IR-Bildmaterials als visuelle Evidenz für den Energietransfer im Rahmen von Energieentwertungsprozessen im Unterricht.

HüF: Insgesamt ist bei einem Vergleich aller Untersuchungsgruppen anzunehmen, dass ein Anstieg im Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung über die Untersuchungsgruppen festgestellt werden kann: angefangen bei der traditionellen Gruppe bis hin zur Gruppe, die im Lehrgang mit mediendidaktischer Einbettung unterrichtet wurde. Darüber hinaus wird als Folgerung aus den theoretischen Überlegungen in Kapitel 2.6 erwartet, dass ein Zusammenhang zwischen dem Verständnis für Energieentwertung sowie Energieerhaltung festzustellen ist.

5 Konzeption des Lehrgangs *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*

Zur Untersuchung der Forschungsfragen (vgl. Kapitel 4.1) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein curriculumorientierter Lehrgang nach dem in Kapitel 2.6 vorgestellten didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* entwickelt, in dem die IR-Kamera als mediale Unterstützung eingesetzt wird (vgl. Kapitel 3.6).

Ausgangspunkt für die Entwicklung bildeten die Lehrgangsinhalte der Vorstudien *Nachmittagsforscher* und *Ferienforscher*, wobei zunächst ein Vergleich der bestehenden Inhalte mit den inhaltbezogenen Kompetenzen des nds. Kerncurriculums im Themengebiet *Energie* für die 7./8. Jahrgangsstufe erfolgte. In diesem Zusammenhang wurden die Lehrgangsinhalte weiterentwickelt, eine strukturelle Anpassung an das in vielen Schulen etablierte Doppelstundenmodell vorgenommen und die curricular geforderten Inhalte²⁷ *Energieübertragungsketten* und *Energieerhaltung* ergänzt. Aufgrund der Zielsetzung des Einsatzes in der Schule wurden bei Experimenten vorwiegend traditionelle Schulexperimente wie beispielsweise Dynamots oder Standardversuchsmaterial wie Rampen, Massestücke und Fahrbahnwagen ausgewählt, die sowohl mit als auch ohne IR-Kamera Beobachtungsmöglichkeiten bieten.

Die grundlegende Struktur des Lehrgangs ist am Kompetenzentwicklungsmodell für das Energiekonzept orientiert, wonach das Verständnis angefangen bei Energieformen und Quellen über Energieumwandlung, Transfer, Entwertung bis hin zur Erhaltung entwickelt wird (K. Neumann et al., 2013; vgl. auch Liu und McKeough, 2005; Kapitel 2.5).

Der zeitliche Umfang des gesamten Lehrgangs entspricht den formalen Vorgaben und umfasst mit 14 Doppelstunden ein Schulhalbjahr. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die **Konzeption des Lehrgangs** ist direkte Folgerung aus den Überlegungen zum didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*. Dabei ist ein Grundgedanke, den Aspekt **Energieerhaltung durch den Aspekt der Energieentwertung mit den Alltagserfahrungen in Verbindung zu bringen**. Hierfür „verfolgen“ die Lernenden an zahlreichen unterschiedlichen Phänomenen den Energiestrom in die Umgebung und deuten ihre Auffassung von Energieverbrauch als Energieentwertung um.

²⁷ Grundlage bildet das nds. Kerncurriculum für die 7./8. Jahrgangsstufe (Kultusministerkonferenz, 2015).

Tabelle 1: Inhalte und Ablauf der Unterrichtsreihe.

DS	Inhaltlicher Schwerpunkt der Stunde	
1	Einführung der Messgröße Temperatur unter Verwendung verschiedener Messinstrumente, unter anderem der IR-Kamera.	Energielehrgang Teil 1
2	Einführung in den Themenbereich Energie; Anknüpfung an Schülervorstellungen. Dabei werden bereits Quellen und Formen herausgestellt. Festhalten der Fragestellung „ <i>Warum kommen manche Bewegungen scheinbar von allein zum Stehen, während andere weiterlaufen?</i> “.	
3/4	Identifizieren der Indikatoren für die Bewegungs- und Höhenenergie. → Bewegungsenergie: Geschwindigkeit, Masse. → Höhenenergie: Masse und Höhe.	
5/6	Einführung in die Energieumwandlung über die Indikatoren. Weitere Indikatoren für Energieformen werden eingeführt (z.B. Ausdehnung, Temperatur etc.) Hierfür werden sowohl mechanische als auch nichtmechanische Vorgänge (bspw. das Brennen eines Teelichts) betrachtet.	
7/8	Einführung von Energietransfer mit Hilfe von Energieübertragungsketten (Stationenlernen).	Intervention: Energielehrgang Teil 2
9	Betrachten von Umwandlungsvorgängen unter dem Aspekt der Entwertung (Stationenlernen).	
10/11	Energietransfer unter dem Aspekt der Entwertung (Stationenlernen).	
12	Einführung der Temperatur im Teilchenmodell. Modellierung des Energietransfers in die Umgebung.	
13/14	Abschließende Begriffseinführung der Erhaltung ergänzend zur Entwertung, wobei die Begriffsbildung in allen vorherigen Stunden bereits angelegt ist. Dabei wurde eine Formulierung über die Erhaltung der Menge vorgenommen. Betrachten idealisierter Vorgänge.	

Ein didaktisch-methodisches Grundelement bildet das Stationenlernen, da dieses den Lernenden anhand vieler unterschiedlicher Phänomene die gleichen Erfahrungen ermöglicht (Fortus, 2016).

Laut nds. Curriculum soll im Anfangsunterricht zunächst eine qualitative Betrachtung von Energie ohne formale Beschreibung erfolgen, diese jedoch als messbare²⁸ Größe definiert werden (Kultusministerkonferenz, 2015). Da ohne die Vorstellung von Energie als Quantität nicht über Erhaltung gesprochen werden kann, ist es notwendig, auch eine Vorstellung über die Mengenhaftigkeit von Energie anzubahnen. Diese Vorstellung kann durch die Einführung

²⁸ Genauer sollen die Lernenden Energie die Einheit Joule zuordnen und typische Größenordnungen der Energiestromstärke angeben können (Kultusministerkonferenz, 2015).

von Indikatoren gestützt werden, die einen Schluss auf Energieform und Menge erlauben (K. Neumann, 2018). Der Bilanzierungsgedanke kann ebenfalls durch den Einsatz von Modellen veranschaulicht bzw. transparenter gemacht werden (Friege, Scholz & Oberholz, 2018). Dabei handelt es sich vorwiegend um Darstellungen, bei denen durch Blockdiagramme bzw. Balken, Pfeile und Farben wichtige Elemente hervorgehoben werden (Kircher, 2009). Um die Grundidee der Bilanzierung graphisch darzustellen, eignet sich insbesondere ein Energiekontomodell.

Mit dem Ziel der Abstimmung des Modells an das zugrundeliegende didaktische Konzept erfolgt im Rahmen der Weiterentwicklung des Lehrgangs ebenfalls eine Anpassung des Energiekontomodells an die Lehrgangsziele.

Im Folgenden wird das adaptierte Kontomodell *mit Fokus auf Transfer* vorgestellt sowie die Chancen und Grenzen des Modells beleuchtet. Dabei ist das Modell als Element des Lehrgangs zu verstehen, welches das didaktische Konzept geeignet unterstützen soll. Es ist jedoch nicht Ziel der Studien, die Wirksamkeit einzelner Elemente des Lehrgangs, wie das entwickelte Modell, zu untersuchen, sondern die Untersuchung des Lehrgangs als Ganzes (vgl. Burde, 2018). Aus diesem Grund erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine allgemeine, theoriegeleitete Begriffsdefinition bzw. Funktionsanalyse von Modellen aus fachdidaktischer Sicht.

5.1 Adaptiertes Kontomodell: *Fokus auf Transfer*

Die Aufgabe von Modellen innerhalb des Energiekonzepts ist die Visualisierung von Informationen über Vorgänge oder Zusammenhänge. Hierzu zählen unter anderem Energieflussdiagramme, Energiekontomodelle sowie Energieübertragungsketten²⁹. Eine Forderung an diese Modelle ist, dass sie über alle Jahrgangsstufen hinweg vernetzungs- sowie tragfähig bleiben. Teilweise wird die graphische Darstellung im Zusammenhang mit Energie sogar curricular gefordert (Friege et al., 2018). So heißt es im nds. Kerncurriculum im Rahmen der Zusammenführung der inhalts- und prozessbezogenen Kompetenzen unter dem Aspekt Kommunikation:

²⁹ Diese graphischen Darstellungen kommen überwiegend in Schulbüchern vor (Friege, Scholz und Oberholz, 2018). Jedoch gibt es auch haptische Veranschaulichungen, wie das Würfelmodell von Hadinek, Weißnigk und Neumann (2018) oder das „Energy Theater“, welches (ergänzend) in einem „Energy tracking diagram“ verschriftlicht werden kann (Scherr et al., 2016).

„veranschaulichen die [Energie-]Bilanzen grafisch mit dem Kontomodell“ (Kultusministerkonferenz, 2015, S. 33). Bei einem Energiekontomodell handelt es sich demnach um eine graphische Darstellung, die den Bilanzierungsgedanken von Energie in den Vordergrund stellt (Friege et al., 2018). Dabei gibt es in der Literatur jedoch z.T. viele unterschiedliche Varianten in der Darstellung von Energiekonten (Friege et al., 2018). Häufig werden bei Energiekontomodellen einem Vorgang zunächst verschiedene Energieformen zugeordnet, die jeweils durch eine Säule repräsentiert sind.

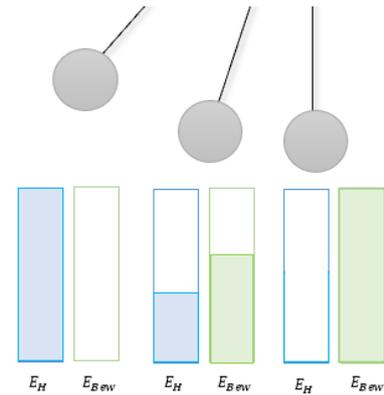


Abbildung 15: Kontomodell mit einzelnen Konten am Beispiel eines Pendels.

Dem Pendel in Abbildung 15 wurden die Energieformen Bewegungs- und Höhenenergie zugeordnet. Von diesem Vorgang kann nun zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein Energiekonto erstellt werden, sodass mit der Füllhöhe der Säulen der einzelnen Energieformen eine Aussage über die Energiebilanz zu diesem Zeitpunkt getroffen werden kann. Zu Beginn des Vorgangs ist hier die Säule der Höhenenergie ganz gefüllt, während die Bewegungsenergiesäule noch leer ist. Im Laufe des Vorgangs nimmt die Füllhöhe der Höhenenergiesäule zunächst ab, während die Füllhöhe der Bewegungsenergie ansteigt. Am tiefsten Punkt ist die Säule der Höhenenergie leer, die gesamte Energie wurde von einer Säule zur anderen „transferiert“. Dieser Energietransfer ist jedoch der Darstellung nicht zu entnehmen. Die Füllhöhen der Säulen ergänzen sich stets zu einer ganzen Säule; die betrachteten Zeitpunkte können dabei beliebig gewählt werden. Bei dieser Art der Darstellung ist das Ergänzen der Füllhöhen zu einer ganzen Säulenhöhe nicht immer auf den ersten Blick erkennbar. Aus der Addition ergibt sich jedoch

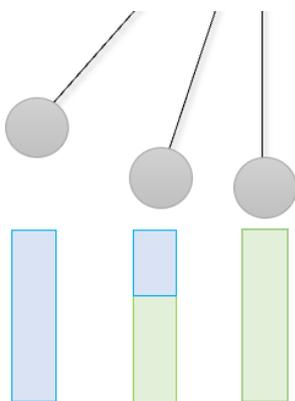


Abbildung 16: Kontomodell mit addierten Füllhöhen am Beispiel eines Pendels.

die wichtige Information der Energieerhaltung. Daher wird zur Verdeutlichung dieses Darstellungsaspektes in einigen Kontomodellen eine Säule ergänzt, die alle Formen in einer Säule darstellt. Neben dieser Möglichkeit gibt es auch Energiekonten, die zu jedem Zeitpunkt ausschließlich die addierten Füllhöhen der Energieformen anzeigen (vgl. Abbildung 16). Dies hat den Vorteil, dass die Darstellung übersichtlich bleibt und die Energieumwandlung sowie Energieerhaltung gut erkennbar sind (Friege et al., 2018).

In den bisher betrachteten Darstellungen wird jedoch ein wichtiger Gedanke von Energiebewertungsprozessen nicht direkt sichtbar: der Energietransfer in die Umgebung. Zwar ist dies implizit durch die Vorstellung des Transfers von Energie von „Säule zu Säule“ bzw. „Konto zu Konto“ enthalten, dies erfordert aber vom Betrachter bereits Kenntnisse oder Vorstellungen über Systeme bzw. Systemgrenzen. Eine explizite Darstellung dieses Energietransfers gelingt mit dem Kontomodell in dieser Darstellungsform nicht.

Da dieser Gedanke jedoch einen Grundpfeiler des in Kapitel 2.6 beschriebenen didaktischen Konzepts *Energiebewertung mit Fokus auf Transfer* darstellt, scheint es notwendig, das Kontomodell im Rahmen des Lehrgangs so zu ergänzen, dass diese Information explizit erkennbar wird.

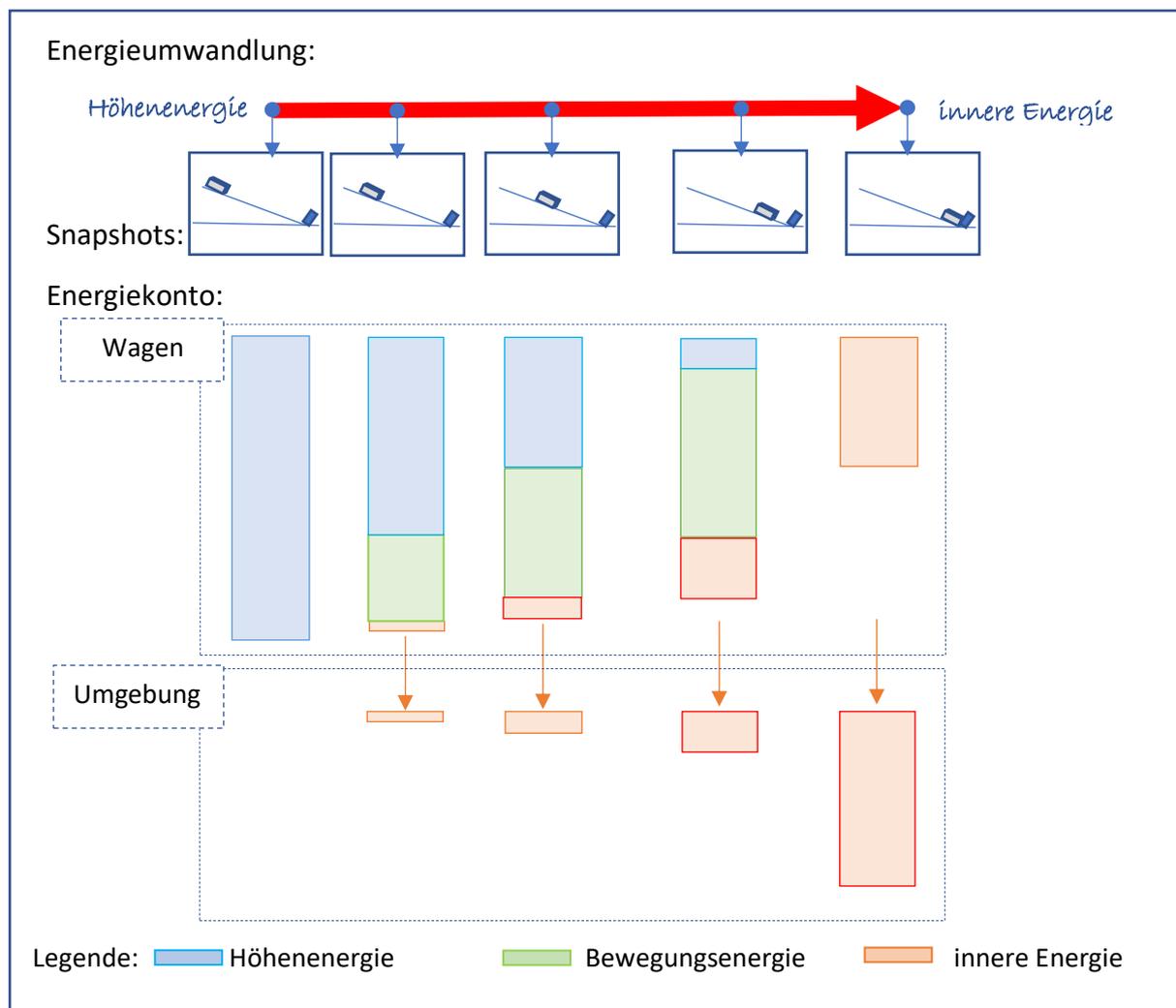


Abbildung 17: Adaptiertes Kontomodell am Beispiel eines Wagens auf der schiefen Ebene.

Abbildung 17 zeigt das im Rahmen des Lehrgangs adaptierte Kontomodell am Beispiel des Wagens auf der schiefen Ebene. Zunächst wird durch einen Pfeil (rot) der Umwandlungsprozess dargestellt, der durch seine Positionierung an einen kontinuierlichen Zeitstrahl erinnern

soll. Dabei wird an den Anfang des Pfeils die Energieform geschrieben, die dem Prozess zu diesem Zeitpunkt zugeordnet wird und an die Pfeilspitze die Energieform(en) am Ende des Prozesses. In diesem Fall wird demnach Höhenenergie nach und nach in innere Energie umgewandelt. Die sogenannten Snapshots werden auf dem Pfeil verortet, d. h. der Vorgang wird zu den gewählten Zeitpunkten betrachtet. Zu jedem Snapshot werden hier im Energiekonto ausschließlich die addierten Füllhöhen der Säule bilanziert. Jedoch werden hier Wagen und Rampe bzw. Umgebung nicht als ein System zusammengefasst, sondern getrennt voneinander betrachtet. So wird nach und nach ein Teil der Energie nicht mehr dem Wagen zugeordnet, sondern der Rampe bzw. Umgebung. Da in Folge des Reibungsprozesses beide Reibungspartner eine Temperaturerhöhung erfahren, kann mittels des Indikators Temperatur auf eine Zunahme der inneren Energie geschlossen werden. Demnach wird auch die innere Energie der Umgebung erhöht. Für die Energiebilanz bedeutet dies, dass ein Teil der Gesamtenergie nun der Rampe zugeordnet wird. Durch Pfeile kann der Vorgang als Energietransfer visualisiert werden.

Diese Variante der Darstellung der Vorgänge im Kontomodell hat das Potenzial Lernschwierigkeiten beim Energieerhaltungssatz zu adressieren: Nach Solomon (1985) interpretierten Schülerinnen und Schüler den Energieerhaltungssatz so, dass die Energie am Ende eines Prozesses im Objekt *gelagert* ist und das System nicht verlässt (vgl. Kapitel 2.4.2). Das weiterentwickelte Modell trifft eine Unterscheidung zwischen Systemen wie in diesem Fall System „Wagen“ und System „Umgebung“ und soll so eine tragfähige Interpretation des Energieerhaltungssatzes als Mengenerhalt der Gesamtenergie anbahnen. Dies kann im Unterricht visuell gestützt werden, indem eine Auswahl der Energiemenge für die Umgebung orientiert an der Säulenhöhe des Systems *Wagen* erfolgt, die sich zu einer ganzen Säule ergänzen müssen. Dieser Schritt betont die Erhaltung, macht aber deutlich, dass diese Energiemenge nicht mehr dem System *Wagen* zugeordnet wird. Die Handlung des Herunterlegens einer Energiemenge vom System *Wagen* zum System *Umgebung* knüpft zudem an das für Schülerinnen und Schüler besser verständliche Konzept des Energietransfers an, nach der Energie zwischen Systemen hin- und hertransferiert werden kann (Behle & Wilhelm, 2017).

Ein Kennzeichen von Modellen ist das Verkürzungsmerkmal; d. h. dass nicht alle Informationen der modellierten Theorie oder des Konzepts dem Modell entnommen werden können. Dies gilt auch andersherum: Dem Modell können Informationen entnommen werden, die nicht der Theorie oder dem Konzept entsprechen. Im Zusammenhang mit dieser Eigenschaft

von Modellen spricht man in beiden Fällen von den Grenzen des Modells (Kircher, 2009). Auch das adaptierte Kontomodell weist aus fachlicher Sicht Grenzen auf.

Die Darstellung könnte zu fachlich nicht korrekten Vorstellungen oder Ungenauigkeiten hinsichtlich der Lokalisation von Energie *in* Objekten führen. Beispielsweise wird die Höhenenergie nicht dem Wagen zugeordnet, sondern dem Schwerpunktsystem Erde-Wagen. Jedoch wird diese Unterscheidung in der Zuordnung nicht von allen Schülerbüchern vorgenommen. Durch die extreme Massenasymmetrie Erde/Wagen ist diese didaktische Reduktion, die die Höhenenergie dem Wagen zuordnet, möglich. Darüber hinaus ist diese Vorstellung leichter zugänglich als die Feldvorstellung (Millar, 2014).

Weiterhin können Schwierigkeiten bei der Abgrenzung von Prozess- und Zustandsgrößen auftreten, folglich könnte es hier zur Missinterpretation hinsichtlich der Übertragung einer bestimmten Energieform, wie in diesem Fall der inneren Energie, kommen. Dies wird durch das Herunterlegen einer Energiemenge und der damit verbundenen zwangsläufigen Auswahl einer Energieform noch begünstigt. Nach Boyes und Stainisstreet (1990) haben Schülerinnen und Schüler Schwierigkeiten, zwischen übertragener Energie und Energie selbst zu unterscheiden. Diesen Schwierigkeiten muss im Unterricht begegnet werden, indem diese Modellgrenze gezielt angesprochen wird.

Ebenso wird die ohnehin schon hohe Informationsdichte (Friege et al., 2018) durch die Unterscheidung der Systeme und den obigen Prozesspfeil noch wesentlich erhöht. Innerhalb des Lehrgangs wird das Modell jedoch im Zusammenhang mit Energieumwandlungsprozessen zunächst ohne Berücksichtigung der Entwertung eingeführt und im Unterricht Schritt für Schritt entwickelt. Die Lernenden bekommen Gelegenheit das selbstständige Anfertigen und das „Lesen“ des Modells anhand vieler unterschiedlicher Phänomene zu automatisieren. Erst nach der Einführung des Energietransfers³⁰ wird eine Erweiterung des Modells im Rahmen von Energieentwertungsprozessen vorgenommen.

Darüber hinaus haben im adaptierten Modell die Pfeile unterschiedliche Bedeutungen; zum einen wird durch den obigen, roten Pfeil der Umwandlungsprozess beschrieben, zum anderen soll mit den unteren, orangen Pfeilen der Energietransfer verdeutlicht werden. Die farbliche Trennung wurde bewusst gewählt und soll diese Unterscheidung verdeutlichen.

³⁰ Der Energietransfer wird mittels Energieübertragungsketten in Anlehnung an das Schulbuch Dorn Bader Physik 7/8 Gymnasium Niedersachsen visualisiert (Oberholz, 2015).

5.2 Konzeption des Lehrgangs

Im Folgenden wird eine Einordnung der Stunden in die Unterrichtsreihe vorgenommen und die Ziele der Stunde hinsichtlich des didaktischen Konzepts beschrieben. Ebenfalls erfolgt eine Legitimation im Hinblick auf die in Kapitel 2 und 3 dargelegten theoretischen Grundlagen, wobei insbesondere auf die bekannten Schülervorstellungen und identifizierten Lernschwierigkeiten sowie die Verständnisenwicklung innerhalb des Energiekonzepts eingegangen wird (vgl. Kapitel 2.4.1 sowie 2.4.2). Die Lernziele der Stunden, die zentralen Lernhandlungen³¹ sowie die didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs werden in Anhang A näher erläutert.

5.2.1 Temperatur als Messgröße (1. Doppelstunde)

In der ersten Doppelstunde wird die Temperatur als objektivierbare Messgröße eingeführt, die innerhalb des Lehrgangs eine zentrale Rolle einnimmt, da sie als Indikator für innere Energie dient und somit im Rahmen von Energieentwertungsprozessen zur Beschreibung von Vorgängen herangezogen werden kann. Dabei steht die Notwendigkeit der Objektivierbarkeit der Messung durch geeignete Messinstrumente im Vordergrund, wobei gezielt eine Abgrenzung gegenüber dem subjektiven Tastsinn stattfindet (vgl. Kapitel 2.4.1.2 und 3.4.3, Clough & Driver, 1985; Duit, 1995, Haglund, Jeppsson et al., 2015). Im Rahmen von Experimenten führen die Lernenden mittels verschiedener Thermometer Temperaturmessungen durch (vgl. Anhang A.1, S. 235). In diesem Zusammenhang wird die IR-Kamera als Messinstrument zur Bestimmung der Temperatur von Objekten eingeführt und eine erste Interpretation der IR-Bilder im Hinblick auf Zuordnung der Farbcodierung zu verschiedenen Temperaturen vorgenommen (vgl. Anhang A.2, S.236).

5.2.2 Einführung in den Themenbereich Energie (2. Doppelstunde)

In der zweiten Doppelstunde erfolgt über das Anfertigen von Mind-Maps die Einführung in das Themengebiet Energie. Im Rahmen dieser zentralen Lernhandlung erhalten die Schülerinnen und Schüler vorgegebene Abbildungen von verschiedenen Alltagssituationen und Gegenständen, die sie in einen selbst gewählten Sinnzusammenhang mit Energie bringen sollen. Ziel dieser Phase ist einerseits die Aktivierung des Vorwissens der Schülerinnen und Schüler sowie andererseits der Lehrperson Einblicke in die Vorstellungen der Lerngruppe zu ermöglichen.

³¹ In der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff Lernhandlung die aktive, kognitive Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand verstanden.

Auf dieses Vorwissen bzw. die Vorerfahrungen kann und soll während der gesamten Einheit zurückgegriffen werden. Auf Grundlage der erstellten Mind-Maps werden die Begriffe Energieform und Energiequelle eingeführt. Ebenfalls kann hier im Zusammenhang von Solaranlagen oder Windrädern bereits von einer beabsichtigten Veränderung der Energieform gesprochen werden (vgl. Anhang A.3, S. 238).

Im zweiten Teil der Doppelstunde werden Alltagsprozesse wie das Pendeln eines Spielzeugpendels oder die Bewegung eines Kreisels betrachtet. Diese Vorgänge werden jedoch durch Zuführen von Energie aus einer externen Quelle so manipuliert, dass diese nicht zum Stillstand kommen. Die Manipulation ist für die Lernenden jedoch nicht direkt einsehbar. Dies hat zur Folge, dass die Vorgänge zu einem Widerspruch zu den gefestigten Alltagserfahrungen der Lernenden führen. Die Leitfrage: *„Warum kommen manche Bewegungen scheinbar von allein zum Stehen, während andere weiterlaufen?“* wird aufgeworfen. Diese Frage kann von den Lernenden im weiteren Verlauf immer wieder neu hinterfragt, ausgeschärft und schließlich am Ende der Einheit beantwortet werden (vgl. Anhang A.4, S. 239 in Anlehnung an Weßnigk und Neumann, 2014).

5.2.3 Energieformen (3. und 4. Doppelstunde)

Obwohl die Verständnisenwicklung im Hinblick auf den Aspekt der Energieformen für Lernende nicht problematisch scheint (vgl. Kapitel 2.5), liegt eine Herausforderung beim Lernen darin, Energieformen nicht zu beliebig erweiterbaren „*Etiketten*“ werden zu lassen, die auf Vorgänge „*geklebt*“ werden (K. Neumann, 2018, S. 8)³². Um dies zu vermeiden, kann im Unterricht die Einführung von Indikatoren vorgenommen werden. Dabei handelt es sich um Einflussfaktoren, auf deren Grundlage eine Zuordnung von Energieformen zu einem Prozess erfolgen kann (K. Neumann, 2018). Beispielsweise sind für die Bewegungsenergie solche Indikatoren die Geschwindigkeit oder die Masse. Die Betrachtung von Indikatoren kann die Schülerinnen und Schüler darin unterstützen, Vorgängen Energieformen begründet zuzuordnen und die Mengenartigkeit zu erfassen. Diese Eigenschaft der Bilanzierung ist speziell im Hinblick auf die Aspekte Energieumwandlung und Energieerhaltung von besonderer Bedeutung. Ebenfalls

³² Aus diesem Grund kann der Zugang zum Energiekonzept über Energieformen kritisch gesehen werden (vgl. bspw. Millar, 2014). Ein Ansatz, der diese Problematik berücksichtigt, ist der „System-Transfer-Ansatz“ von Fortus et al. (2019), der keine Energieformen erfordert und die Verbindungen zwischen Energie, Systemen und Feldern betont (S. 2). Es lassen sich dennoch Parallelen dieses Ansatzes zum didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* erkennen, da auch hier der Energietransfer fokussiert wird. Jedoch wird beim Ansatz der vorliegenden Arbeit eine Verbindung zu Energieformen hergestellt.

eignet sich die Einführung von Indikatoren hinsichtlich des Aspekts der Energieentwertung: Die Temperatur kann als Indikator für die innere Energie im Rahmen von Entwertungsprozessen gesehen werden (vgl. Kapitel 2.6 und 3.6) und ist zum einen mittels IR-Kamera messbar und zum anderen bei ausgewählten Zusatzhandlungen³³ im Lehrgang haptisch wahrnehmbar. Im Rahmen dieser Stunden führen die Schülerinnen und Schüler Experimente zur Untersuchung des Einflusses von Masse, Höhe und Geschwindigkeit auf Höhen- und Bewegungsenergie durch und beschreiben den Zusammenhang in „je-desto“-Form (vgl. Anhang A.5 und A.6, S. 242ff) .

5.2.4 Energieumwandlung (5. und 6. Doppelstunde)

Aufbauend auf dem Konzept der Energieformen können Bilanzierungen im Rahmen von Energieumwandlungsprozessen vorgenommen werden, die eine Aussage über die Energieverteilung in Abhängigkeit von der Zeit erlauben. In diesem Zusammenhang kann auf Grundlage von Indikatoren auf die Menge der betreffenden Energieformen geschlossen werden. Dabei ist der Energieumwandlungsgedanke Grundstein für die Energieerhaltung; trotz der Änderungen auf phänomenologischer Ebene, also der Energieumwandlung, bleibt die Gesamtmenge der Energie zu jedem Zeitpunkt gleich (Duit, 2014).

Energieumwandlungsprozesse können mittels Kontomodellen modelliert werden (vgl. Kapitel 5.1). Im Rahmen des entwickelten Lehrgangs wird auf das adaptierte Kontomodell *mit Fokus auf Transfer* zurückgegriffen, welches in dieser Stunde anhand eines Beispiels eingeführt wird. Bei der Einführung des Energieumwandlungsprozesses werden zunächst idealisierte Vorgänge betrachtet, d. h. Entwertungsprozesse werden vorerst nicht berücksichtigt. Hierfür wurden Prozesse bewusst nur ausschnittsweise betrachtet oder zu einem bestimmten Zeitpunkt angehalten, wie beispielsweise die erste Schwingungsperiode eines Fadenpendels. Diese Idealisierung stellt eine didaktische Reduktion dar: Für die Verständniserweiterung hinsichtlich der komplexeren Entwertungs Vorgänge ist nach dem entwickelten didaktischen Konzept zunächst eine Konzeptualisierung von Umwandlung und Transfer notwendig (vgl. Kapitel 2.6). Die Vorgehensweise impliziert jedoch auch die Frage, wie sich der Energieumwandlungsprozess verändern würde, wenn dieser *zu Ende* betrachtet würde. Diese Frage sollte im Unterricht (von den Lernenden) gestellt und festgehalten werden, da sie den Anknüpfungspunkt für Entwertungs Vorgänge bildet. Ebenso stellt dies eine Präzisierung des ersten Satzteils der

³³ Eine Begriffsklärung erfolgt in Kapitel 5.2.6.

Reihenleitfrage dar „**Warum kommen manche Bewegungen scheinbar von allein zum Stehen, während andere weiterlaufen?**“ (vgl. Anhang A.7 und A.8, S. 243ff).

5.2.5 Energietransfer (7. und 8. Doppelstunde)

Das Konzept des Energietransfers ist ein wichtiges Element des entwickelten didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*, bei dem der Energietransfer in die Umgebung als Aspekt von Entwertungsprozessen verstanden wird und als Bindeglied zwischen Energieerhaltung und Entwertung fungiert (vgl. Kapitel 2.6). Daher ist innerhalb des Lehrgangs ein Verständnis des Energietransfers Voraussetzung für ein Verständnis von Energieentwertung (auch im Hinblick auf das Verstehen des IR-Bildmaterials, vgl. Kapitel 3.3.2). Daher sollen die Lernenden in dieser Stunde zunächst verschiedene Vorgänge unter dem Aspekt des Energietransfers zwischen Systemen als Energieübertragungsketten beschreiben. Aus fachdidaktischer Forschung ist bekannt, dass Lernende bereits am Anfang von Sekundarstufe I auch bei komplexeren Experimenten den kausalen Ablauf angeben können und eine Vorstellung der Weitergabe von Energie ausbilden (Behle & Wilhelm, 2017; Duit, 2004; Rhöneck, 1986). An diese Vorstellungen soll in den konzipierten Stunden angeknüpft werden (vgl. Anhang A.9 und A.10, S. 246ff). Da hier der Fokus der Betrachtung auf der Übertragung von Energie von einem System zum anderen liegt, wird die dabei stattfindende Energieumwandlung nicht explizit thematisiert, d. h. „*simply focus on where energy is stored*“ (Millar, 2014, S. 192). Zur Visualisierung der Vorgänge wird ein Energieflussdiagramm eingeführt, das diesen System-Transfer betont (in Anlehnung an das Schulbuch Dorn Bader Physik Band 7/8, Oberholz, 2015).

5.2.6 Energieentwertung bei Energieumwandlungs- und Übertragungsprozessen (9. bis 11. Doppelstunde)

Das Energiekonzept ist u. a. von Nutzen, da es eine Vorhersage über die Geschwindigkeit, die Höhe oder die Temperatur eines Körpers nach einem Umwandlungs- oder Übertragungsprozess erlaubt. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme der Energieerhaltung. Der Fachlogik folgend müsste als erster Schritt die Einführung der Energieerhaltung als Postulat erfolgen, da beispielsweise die Idee der Umwandlung den Mengenerhalt voraussetzt. „*Die Forschung legt jedoch nahe, dass gerade diese Vorgehensweise den Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten bereitet*“ (K. Neumann, 2018, S. 8). Bei einem fallenden Gegenstand kann während des Falls anhand der Indikatoren Höhe und Geschwindigkeit noch eindeutig auf eine Energieumwandlung geschlossen werden. Doch spätestens nach dem Aufprall auf dem Boden ist der

Verbleib der Energie unklar. An dieser Stelle geben viele Schülerinnen und Schüler die Energieerhaltung auf (K. Neumann, 2018; vgl. Kapitel 2.4.2). Daher sollte das Konzept der Energieentwertung *vor* der Energieerhaltung eingeführt werden (K. Neumann, 2018; Solomon, 1985). Wird der Vorgang des fallenden Gegenstandes unter dem Aspekt der Energieentwertung betrachtet, kann die Energie auch nach dem Aufprall im Sinne einer Umwandlung von Energie in innere Energie und Energieübertragung an die Umgebung verfolgt werden. Um die Lernenden bei der „Verfolgung“ der Energie in die Umgebung zu unterstützen, können Szenarien herangezogen werden, bei denen eine beobachtbare Temperaturerhöhung stattfindet (Daane et al., 2015). Aus diesem Grund werden bei Experimenten innerhalb des Lehrgangs sogenannte Zusatzhandlungen durchgeführt, bei denen eine sinnlich beobachtbare Temperaturerhöhung stattfindet. Beispielsweise sollen die Lernenden mit einem Radiergummi einige Male über den Tisch radieren und danach sowohl den Tisch als auch das Radiergummi befühlen. Dabei stellen sie sowohl eine Temperaturerhöhung des Radiergummis als auch des Tisches fest. Diese Beobachtung soll in einem nächsten Schritt auf die Vorgänge beim Experiment bezogen werden und so Rückschlüsse auf die Energie erlauben.

In den Untersuchungsgruppen, die eine IR-Kamera zum Experimentieren verwenden, ist eine Beobachtung der Temperaturerhöhung möglich: Die IR-Kamera zeigt das dynamische veränderliche Temperaturprofil von Oberflächen innerhalb eines Beobachtungsbereichs. Mittels IR-Kamera kann somit ein Indikator für die innere Energie, die Temperatur, direkt³⁴ beobachtet werden (vgl. Kapitel 3.6). Bei der Auswahl wurde teilweise auf bereits entwickelte Experimente zurückgegriffen (Kriks, 2016; Kröger, 2012; vgl. Kapitel 3.5.3). Innerhalb des Lehrgangs wurden ausschließlich Experimente gewählt, bei denen die IR-Kamera einsetzbar ist, die aber auch Beobachtungsmöglichkeiten ohne die Verwendung der IR-Kamera bieten, wie beispielsweise die Abnahme der Geschwindigkeit. Auch bei den Übertragungsketten der nachfolgenden Stunden lässt sich ohne IR-Kamera auf einen Energiestrom in die Umgebung schließen (vgl. Anhang A.11, A.12 und A.13, S. 249ff).

5.2.7 Temperatur im Teilchenmodell (12. Doppelstunde)

Ein umfassendes Verständnis von Energieentwertung erfordert neben der Betrachtung der Vorgänge aus energetischer Sicht ebenfalls die Kenntnis des Entropiekonzepts. Allein durch die Prämisse der Energieerhaltung ist die Irreversibilität von Vorgängen nicht erklärbar

³⁴ Direkt beobachtbar ist nur die Farbcodierung. Jedoch können Lernende nach einiger Erfahrung im Umgang mit der IR-Kamera immer leichter Rückschlüsse auf die Temperatur ziehen (vgl. Kapitel 3.4.2).

(Meschede, 2002; vgl. Kapitel 2.1). Jedoch ist die Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen im nds. Kerncurriculum erst am Ende von Schuljahrgang 10 gefordert (Kultusministerkonferenz, 2015).

Eine Möglichkeit die Vorstellung der Unumkehrbarkeit von real ablaufenden Vorgängen anzubahnen ist die übertragene Energie im System Umgebung weiter „zu verfolgen“. Wird Energie durch Arbeit oder Wärme an das System *Umgebung* übertragen, findet ein unaufhaltsamer Weitertransport dieser Energie durch Wärme statt. Die Systemgrenzen umfassen somit einen immer größer werdenden Raum; es findet ein Temperatúrausgleich statt. Diese Vorstellung wird in dieser Stunde durch das Mischen von Wasser unterschiedlicher Temperatur in immer größer werden Becken simuliert (vgl. Anhang A.14, S.253). Eine Beobachtung des Mischvorgangs wird durch das Einfärben des Wassers erreicht. Darüber hinaus kann die IR-Kamera genutzt werden, um einen Einblick in das thermische Phänomen der Wärmeleitung auf makroskopischer Ebene zu gewähren (vgl. Kapitel 3.3 und 3.5.3). Jedoch können Lernende beide Beobachtungen ohne die Kenntnis von mikroskopischen Modellen nicht ohne Weiteres hinsichtlich Wärmeleitung bzw. als Prozess interpretieren. Hier kann die explizite Einführung von molekularen Modellen einen vielversprechenderen Weg bieten (Haglund, Jeppsson et al., 2015; vgl. Kapitel 3.4.3). Demzufolge wird das Teilchenmodell innerhalb des Lehrgangs zur Veranschaulichung unterschiedlicher Temperaturen bzw. des Temperatúrausgleichs herangezogen, um den Schülerinnen und Schülern die „Verfolgung“ der Energie in der Umgebung mittels Indikators zu ermöglichen. Das Teilchenmodell ist in der Sekundarstufe I fest in den Lehrplänen der Länder verankert (Fischler & Lichtfeldt, 2004); so auch im nds. Kerncurriculum (Kultusministerkonferenz, 2015). Erst in dieser Doppelstunde erfolgt die Begriffseinführung der Energieentwertung, da der unaufhaltsame Weitertransport der Energie in der Umgebung ein wichtiges Element der Begriffsbildung darstellt.

5.2.8 Energieentwertung und Energieerhaltung (13. und 14. Doppelstunde)

Ein Verständnis für das Energieerhaltungsprinzip, das über die bloße Wiedergabe des Erhaltungssatzes in der Form „Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden“ hinausgeht, stellt wohl eine der größten Herausforderungen des Energieunterrichts dar (Duit, 2004; K. Neumann, 2018).

Auf Grundlage der Überlegungen des didaktischen Konzepts wird in den folgenden Stunden bei dem Experiment einer symmetrischen *Kugelbahn* der Fokus der Betrachtung auf die

Energieentwertung und dem damit verbundenen Energietransfer in die Umgebung gelegt. Die Schülerinnen und Schüler erhalten die Gelegenheit, den real ablaufenden Vorgang hinsichtlich auftretender Entwertungsvorgänge zu untersuchen und damit die Abnahme der (ersten) Pendelamplitude der Kugel durch den Energietransfer in die Umgebung zu erklären. Je geringer die erreichte Höhe, desto größer der Anteil der entwerteten bzw. transferierten Energie an der Gesamtenergie.

Bei jedem Vorgang bleibt die Gesamtmenge der Energie während des gesamten Prozesses gleich; sie wird bei real ablaufenden Vorgängen nur einem anderen System³⁵ zugeordnet.

Da es durch die Formulierung des Energieerhaltungssatzes in der Form „Energie kann nicht vernichtet werden“ zu Lernschwierigkeiten kommen kann (Kesidou & Duit, 1993; Solomon, 1985; vgl. Kapitel 2.4.2), wird im Lehrgang eine Formulierung des Erhaltungssatzes gewählt, die den Mengenerhalt betont. Darüber hinaus wird dieser Mengenerhalt unter Berücksichtigung des Energietransfers in die Umgebung herausgestellt. Diese Betrachtung erfolgte bereits in den vorherigen Stunden, sodass die Begriffsbildung des Energieerhaltungssatzes über mehrere Stunden angelegt ist (Fortus, 2016).

Erst nach dieser Betrachtung erfolgt ein Perspektivwechsel, bei dem der Anteil an entwerteter Energie gedanklich verringert wird. Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler die Notwendigkeit der Reduzierung der auftretenden Reibungsvorgänge benennen. Da die vollständige Reduktion von Reibung bei real ablaufenden Prozessen nicht möglich ist, handelt es sich hier um ein Gedankenexperiment. Dieses erlaubt aufgrund des Mengenerhalts der Energie den Schluss auf die maximal erreichte Höhe der Kugel (vgl. Anhang A.15 und A.16, S. 255ff).

³⁵ Dies hängt von den gewählten Systemgrenzen ab.

6 Methode

Das in Kapitel 4 formulierte Forschungsziel sowie die daraus abgeleiteten Forschungsfragen erfordern zum einen die Untersuchung der Lernwirksamkeit des entwickelten Lehrgangs hinsichtlich der Aspekte Energieerhaltung und Energieentwertung. Zum anderen muss eine Untersuchung des Einflusses eines Einsatzes einer IR-Kamera innerhalb des Lehrgangs erfolgen, wobei hier zwischen einem Einsatz als zusätzliches Messinstrument innerhalb des Lehrgangs sowie einer mediendidaktischen Einbettung im Sinne einer Abstimmung des Lehrgangs auf die IR-Kamera unterschieden wird.

Die hierfür notwendigen Untersuchungen gelingen mit Hilfe von **Interventionsstudien**, bei denen gewöhnlich mit Vergleichsgruppen gearbeitet wird (Krüger, Parchmann & Schecker, 2014). In diesem Zusammenhang wird die Intervention als unabhängige Variable und der Lernerfolg, genauer das Verständnis für Energieentwertung und Energieerhaltung, als abhängige Variable definiert.

Nach Bortz und Döring (2006) wird bezüglich der Gültigkeit der Ergebnisse einer Untersuchung zwischen der internen und externen Validität unterschieden. Dabei wird unter der externen Validität die Generalisierbarkeit der *„gefundenen Ergebnisse auf andere Personen, Situationen oder Zeitpunkte“* (Bortz & Döring, 2006, S. 523) verstanden. Eine Studie ist intern valide, wenn die *„Veränderungen der abhängigen Variablen eindeutig auf den Einfluss der unabhängigen Variablen zurückzuführen sind“* (Bortz & Döring, 2006, S. 53).

Die interne bzw. externe Validität einer Studie wird unter anderem durch die Wahl des Untersuchungssettings beeinflusst, wobei zwischen Labor- und Felduntersuchungen unterschieden wird. Eine Felduntersuchung ist durch eine unbeeinflusste, natürliche Untersuchungsumgebung gekennzeichnet, mit der eine hohe externe Validität der Ergebnisse erreicht werden kann (Bortz & Döring, 2006). Eine solche unbeeinflusste Umgebung stellt in diesem Rahmen die Schule dar. Jedoch gilt zu bedenken, dass bei Untersuchungen im Feld sogenannte Störvariablen die abhängige Variable so beeinflussen können, dass die Ergebnisse nicht eindeutig auf die unabhängige Variable zurückzuführen sind. Beispielsweise kann das Lernklima innerhalb einer Klasse den Lernerfolg generell positiv beeinflussen, sodass eine Änderung nicht eindeutig auf die Intervention zurückzuführen ist. Dies führt folglich zu einer geringeren internen Validität der Ergebnisse. Zur Kontrolle dieser Störvariablen kann die Untersuchung im Labor, d. h. in einer speziell geschaffenen Umgebung außerhalb der schulischen Lernsituation,

durchgeführt werden, welches eine gezieltere Einflussnahme ermöglicht (von Aufschneider, 2014). Dies schränkt jedoch wiederum die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein (Bortz & Döring, 2006).

Eine andere Möglichkeit, interne Validität zu erreichen, stellt die Randomisierung der Stichprobe dar, mit der personenbezogene Störvariablen wie beispielsweise die Intelligenz oder das Interesse aufgehoben werden sollen, die das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung beeinflussen können. Im Rahmen dieser sogenannten experimentellen Untersuchung werden die Teilnehmenden zufällig der Interventionsgruppe bzw. der Vergleichsgruppen zugeordnet. Dies würde jedoch bedeuten, dass die Schülerinnen und Schüler ungeachtet ihrer Klassenzugehörigkeit zufällig Lehrpersonen bzw. der Intervention zugeteilt werden. Eine solche Zuordnung ist in der Umgebung Schule aufgrund vielfältiger organisatorischer Gründe nicht möglich, sodass die Stichproben hier aus natürlich vorgefertigten Gruppen bestehen, die über gruppenspezifische Besonderheiten verfügen (Bortz & Döring, 2006). Dies wird durch eine quasi-experimentelle Untersuchung beschrieben, deren interne Validität gegenüber der randomisierten Zuordnung eingeschränkt ist.

Im Hinblick auf die Forschungsfragen soll die Wirksamkeit der Intervention unter realen Bedingungen im Rahmen von **quasi-experimentellen Feldstudien** untersucht werden. Aufgrund der damit einhergehenden Einschränkung der internen Validität, werden zusätzlich zur Untersuchung der abhängigen Variablen des Verständnisses für Energieentwertung und -erhaltung Lernendenvariablen erhoben. Im Folgenden werden das Untersuchungsdesign sowie die gewählten Testinstrumente vorgestellt.

6.1 Forschungsdesign

Die Untersuchung der Lernwirksamkeit des entwickelten Lehrgangs sowie der IR-Kamera erfolgt in einem zweifaktoriellen Design mit 2 bzw. 3 Faktorstufen (2x3-Design). Bei den zu untersuchenden Faktoren handelt es sich zum einen um den Faktor *Lehrgang*, der sich in die Faktorstufen *entwickelter Lehrgang* und *traditioneller Energieunterricht* gliedert, sowie den Faktor *IR-Kamera*, der die drei Stufen *ohne IR-Kamera*, *mit IR-Kamera* und *mit IR-Kamera+* umfasst. Dabei ist unter *mit IR-Kamera* der Einsatz der IR-Kamera als zusätzliches Messinstrument zu verstehen und unter *mit IR-Kamera+* eine spezielle mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera.

In einem zweifaktoriellen Design werden die Faktorstufen miteinander kombiniert (Englisch et al., 2015). Tabelle 2 zeigt die Kreuztabelle der Faktorstufen, wobei in den Zellen die jeweilige Faktorstufenkombination ablesbar ist. Die sich hieraus ergebenden Faktorstufenkombinationen bilden die unabhängigen Variablen *Lehrgang ohne IR-Kamera (LoIR)*, *Lehrgang mit IR-Kamera (LmIR)*, *Lehrgang mit IR-Kamera+ (LmIR+)* sowie *traditioneller Energieunterricht (ohne IR-Kamera) (tE)*. Für diese wird jeweils eine eigene Untersuchungsgruppe sowie Kontrollstrategie benötigt (Englisch et al., 2015).

Tabelle 2: Kreuztabelle der Faktorstufen.

	Lehrgang	traditioneller Energieunterricht
ohne IR-Kamera	Lehrgang ohne IR-Kamera (EmIR/EmIR+: 2016 -19)	traditioneller Energieunterricht ohne IR-Kamera (EmIR+: 2018)
mit IR-Kamera	Lehrgang mit IR-Kamera (EmIR: 2016-17)	X
mit IR-Kamera+	Lehrgang mit IR-Kamera+ (EmIR+: 2018-19)	X

Zwei Zellen der Kreuztabelle werden jedoch gestrichen: *traditioneller Energieunterricht mit IR-Kamera bzw. mit IR-Kamera+*. Diese Kombinationen würden den Einsatz der IR-Kamera im traditionellen Physikunterricht erfordern. Jedoch hat „*jedes Medium bestimmte Implikationen, die in einer anderen deren Art des Lernangebotes resultiert*“ (Kerres, 2003, S. 6). Ein Einsatz der IR-Kamera im traditionellen Energieunterricht würde demnach den Unterricht so

beeinflussen, dass dieser nicht mehr als „traditionell“ im Sinne der hier vorgenommenen Definition beschrieben werden kann. Beispielsweise erfordert ein Einsatz der IR-Kamera eine spezielle Auswahl an geeigneten Experimenten, die evtl. ohne IR-Kamera nicht gewählt werden würden. Aus diesem Grund werden diese Kombinationen nicht berücksichtigt.

Es wird ebenfalls deutlich, dass eine unmittelbare Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Vermittlungsformen nicht gegeben ist (Kerres, 2003); speziell bei Vergleichsstudien mit Medieneinsatz besteht die Problematik eines fairen Vergleichs (Theyßen, 2014). In Vergleichsstudien wird häufig die Lernwirksamkeit von Lehrgängen mit speziellem Medieneinsatz anderen Lehrgängen gegenübergestellt. Die Planung einer zielführenden und fairen Untersuchung erfordert jedoch zunächst die Überlegung, was genau miteinander verglichen werden soll. Hierbei ist zwischen der Untersuchung des „Gesamtpakets“ sowie des „reinen Effekts des Mediums selbst“ (Theyßen, 2014, S. 69) zu unterscheiden. In diesem Fall würde unter dem Gesamtpaket die Untersuchung der Lernwirksamkeit³⁶ des *Lehrgangs bzw. des Lehrgangs in Verbindung mit dem Einsatz IR-Kamera* verstanden werden, während ebenfalls eine Untersuchung *des Effekts der IR-Kamera* selbst möglich ist.

In der vorliegenden Arbeit wird sowohl der Effekt der IR-Kamera als auch die Lernwirksamkeit des Gesamtpakets in zwei aufeinander aufbauenden Studien untersucht. Hierfür wird in der ersten Studie **EmIR** (Energieentwertung mit der IR-Kamera) zunächst der Einfluss des Mediums IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung untersucht, während in der Folgestudie **EmIR+** (Energieentwertung mit der IR-Kamera + mediendidaktische Einbettung) die Untersuchung der Lernwirksamkeit des Gesamtpakets eines speziell auf den Einsatz der IR-Kamera abgestimmten Lehrgangs erfolgt³⁷.

Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Ergebnisse der ersten Untersuchung bei der Planung und Durchführung der zweiten Untersuchung hinsichtlich der Maßnahmen einer mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera in den entwickelten Lehrgang berücksichtigt werden können. Innerhalb von Studien, die über die Interaktion von Lernenden mit der IR-Kamera berichten, wurde diese meist in kontrollierten Settings mit geringer Stichprobengröße eingesetzt. Dabei absolvierten die Lernenden Experimente bzw. Übungen im Umfang

³⁶ Hierbei wird unter Lernwirksamkeit bzw. Lernerfolg ein Zuwachs im Verständnis für die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung gefasst, wobei mit dem Verständnis das Beschreiben und Erklären von Phänomenen gemeint ist (vgl. Kapitel 4.1).

³⁷ Dabei wird für beide Untersuchungen eine geeignete Variablenkontrolle benötigt, die einen fairen Vergleich ermöglicht. Das jeweilige Untersuchungsdesign wird im Rahmen der Beschreibung der Studien genauer betrachtet.

geschlossener, teilweise unverbundener Sinneinheiten (vgl. Kapitel 3.4.3). In den Vorstudien „*Nachmittagsforscher*“ und „*Ferienforscher*“ wurde die IR-Kamera innerhalb eines Lehrgangs eingesetzt, jedoch handelte es sich auch hierbei um eine Laborstudie. Zusammengefasst liegen nur wenige Ergebnisse bzw. Erfahrungen vor, die hinsichtlich einer Abstimmung des Lehrgangs auf den Einsatz der IR-Kamera im schulischen Umfeld herangezogen werden können. Die Durchführung der Studie **EmIR** bietet somit auch die Möglichkeit, diese notwendigen Erfahrungen zu sammeln, das Potenzial der Kamera innerhalb des Lehrgangs zu erkennen und Schwierigkeiten zu identifizieren. Diese bilden die Grundlage für die anschließende Anpassung des Lehrgangs im Sinne einer Abstimmung auf den Einsatz der IR-Kamera, die im Rahmen von **EmIR+** vorgenommen werden soll.

Eine solche Vorgehensweise weist Merkmale des Design-Based-Research-Ansatzes auf, dessen Kennzeichen das zyklische Vorgehen bei der theoriegeleiteten Entwicklung einer Lernumgebung sowie die Erprobung und Untersuchung innerhalb des Forschungsprozesses sind (Wilhelm & Hopf, 2014). Durch die iterative Vorgehensweise gelingt eine fortdauernde Weiterentwicklung der Lernumgebung, wobei ein wichtiges Element die Kohärenz der einzelnen Phasen darstellt (Reinmann, 2005; Wilhelm & Hopf, 2014). Aus diesem Grund ist der Design-Based-Research-Ansatz geprägt durch ein enges Zusammenspiel von Theorie und Praxis. Dabei erlaubt dieser Ansatz die gleichzeitige Veränderung verschiedener Stellschrauben wie beispielsweise der Materialien, Methoden und Visualisierungen, da die Lernumgebungen hinsichtlich des Zusammenspiels dieser einzelnen Faktoren verbessert werden sollen. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass es keine solchen einzelnen, isolierbaren Faktoren gibt (Wilhelm & Hopf, 2014). Im Rahmen **EmIR+** sollen der Lehrgang bzw. die mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang als solche Gesamtpakete evaluiert werden.

Die Untersuchung der Lernwirksamkeit des neu entwickelten Energielehrgangs sowie des Einflusses eines Einsatzes der IR-Kamera erfolgt im faktoriellen Design (**2x3 Design**), aus dem 4 Faktorstufenkombinationen abgeleitet werden können: *Lehrgang ohne IR-Kamera*, *Lehrgang mit IR-Kamera*, *Lehrgang mit IR-Kamera+* sowie *traditioneller Energieunterricht*. Diese bilden die unabhängigen Variablen der Untersuchung, die jeweils einer Untersuchungsgruppe sowie Kontrollstrategie bedürfen.

In der Vergleichsstudie **EmIR** wird zunächst der Einfluss des Mediums IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung untersucht, während in der Folgestudie **EmIR+**

die Untersuchung der Lernwirksamkeit des Gesamtpakets eines speziell auf den Einsatz der IR-Kamera abgestimmten Lehrgangs erfolgt.

Diese schrittweise Untersuchung hat den Vorteil, dass die Untersuchungsergebnisse der ersten Studie EmIR bei der Anpassung des Lehrgangs im Rahmen Folgestudie EmIR+ berücksichtigt werden können.

6.2 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgt im Mixed-Methods-Design, worunter hier die Kombination quantitativer und qualitativer Methoden der Datenerhebung verstanden wird. Bei quantitativen Erhebungsmethoden liegen die Daten in numerischer Form vor, wobei diese in der Regel mittels Fragebögen erhoben werden (Hussy, Schreier & Echterhoff, 2013). Demgegenüber zählen zu den qualitativen Methoden Daten wie Interviews, die einer Deutung bzw. Interpretation bedürfen (Winkel, Fichten & Großmann, 2017). Die Kombination dieser Methoden ermöglicht es, unterschiedliche Perspektiven auf den gleichen Forschungsgegenstand einzunehmen, die „sich gemeinsam zu einem vollständigerem Bild des Gegenstands ergänzen“ (Hussy et al., 2013, S. 289).

Nach der Erhebung der quantitativen und qualitativen Daten erfolgt im Rahmen dieses Designs nach einer jeweils unabhängigen Datenanalyse eine Zusammenführung der Ergebnisse in Form eines Vergleichs bzw. einer Verknüpfung oder Erweiterung (vgl. Abbildung 18).

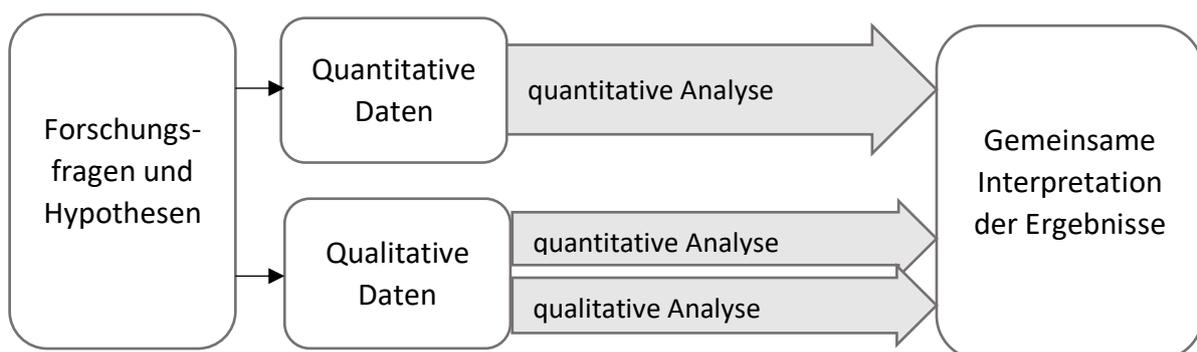


Abbildung 18: Ablaufplan des Mixed-Methods-Designs der Studie (Darstellung angelehnt an Kuckartz, 2014).

In der vorliegenden Arbeit wird ein Design gewählt, bei dem über die Kombination der Methoden der Datenerhebung hinaus ebenfalls eine Kombination der Auswertungsverfahren der qualitativen Daten erfolgt. In diesem Zusammenhang werden die qualitativen Daten mittels einer Analysetechnik in numerische Daten transformiert (Plano-Clark, Huddleston-Casas, Churchill, O'Neil Green & Garrett, 2008). Dabei kann „die Quantifizierung qualitativer Daten ein ergänzender Schritt der Auswertung sein, um die Perspektive zu erweitern und ergänzende

Blickwinkel zur interpretativen Analyse zu sammeln“ (Vogl, 2017, S. 287). Zudem wird ein Vergleich mit den quantitativen Daten erleichtert (Plano-Clark et al., 2008).

Die Wahl eines geeigneten Testinstruments für die jeweiligen Erhebungsmethoden richtet sich nach der abhängigen Variablen. In diesem Fall soll der Einfluss einer Intervention auf den Lernerfolg, d. h. auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung untersucht werden. Demnach werden Testinstrumente benötigt, die das Verständnis für diese Aspekte erfassen. Darüber hinaus müssen für alle Lernendenvariablen, die Einfluss auf das Verständnis haben können, Erhebungsinstrumente vorliegen. In diesem Fall handelt es sich um das fachspezifische Interesse sowie die abstrakte Denkfähigkeit. Da die einzelnen Teilnehmenden aus schulorganisatorischen Gründen im Klassenverband verbleiben, ermöglichen die erhobenen Kontrollvariablen einen Vergleich bezüglich dieser Merkmale (Bortz & Döring, 2006).

Nach Theyßen (2014) sollten für Tests möglichst bereits erprobte Instrumente verwendet werden, da so eine gesicherte Qualität vorliegt und eine Einordnung bezüglich der Ergebnisse anderer Studien vorgenommen werden kann, die dasselbe Instrument nutzten. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung kann ein erprobter paper-pencil-test zur Erhebung des Verständnisses für die Aspekte der Energiequadriga sowie ein validierter Interviewleitfaden genutzt werden. Zur Erhebung der Lernendenvariablen wird ein adaptierter Fragebogen zum fachspezifischen Interesse verwendet und zur Einschätzung des anschauungsgebundenen Denkens eine Subskala eines etablierten kognitiven Fähigkeitstests herangezogen. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

6.2.1 Quantitative Daten: Energietest

Das Energieverständnis wird anhand des Tests von Michel (2018) erhoben. Die 27 MC sowie 8 offenen Items können den Konzepten (1) Formen, (2) Energieumwandlung und Energietransfer, (3) Energieentwertung und (4) Energieerhaltung zugeordnet werden (vgl. Kompetenzentwicklungsmodell, Kapitel 2.5). In Tabelle 3 sind Beispielimis für jeden der vier Aspekte aufgeführt, der verwendete Test befindet sich im Anhang C.1, S.263.

Tabelle 3: Überblick über die Items zu den Aspekten Entwertung und Erhaltung des Energietests (adaptiert nach Michel & Neumann, 2016).

Aspekt	Anzahl	Beispielitem
Formen	11	Eine Schiffsschaukel schwingt ohne Antrieb hin und her. Dabei werden zwei Energieformen ineinander umgewandelt. Welche der folgenden Energieformen ist neben Bewegungsenergie an dem Umwandlungsprozess beteiligt?
Umwandlung und Transfer	6	Ein Wagen fährt eine Rampe herunter. Was gilt für die Bewegungsenergie und Höhenenergie des Wagens?
Entwertung	11	Ein Schüler stößt ein Pendel an und beobachtet dann, wie es von einer Seite zur anderen schwingt. Nach einiger Zeit hört das Pendel auf zu schwingen. Warum?
Erhaltung	7	Ein Achterbahnwagen fährt vom gekennzeichneten Punkt los. Markiere in der Abbildung, bis zu welchem Punkt der Wagen maximal fährt, wenn man die Reibung vernachlässigt.

Bei der Zuordnung der Items zu den Aspekten wurden die folgenden Anpassungen vorgenommen: Item 8 zeigt drei identische Achterbahnen, die auf unterschiedlichen Wegen ausgehend von derselben Startposition dieselbe Höhe erreichen (vgl. Abbildung 19). Unter der Fragestellung

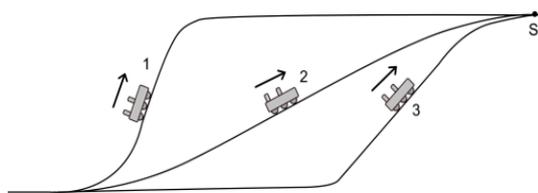


Abbildung 19: Item 8 aus dem Energietest von Michel (2018).

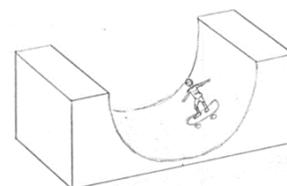
„Welcher Wagen hat dann die größte Höhenenergie?“ sollen die Schülerinnen und Schüler aus 5 Antwortmöglichkeiten die Antwort „Die Höhenenergie ist für alle drei Wagen gleich“ auswählen.

Ursprünglich wurde dieses Item dem Aspekt Energieerhaltung zugeordnet. Da zur richtigen Beantwortung der Fragestellung jedoch Kenntnisse über den Einfluss der Höhe auf die Höhenenergie hinreichend sind und ein Verständnis des Mengenerhalts nicht erforderlich ist, wurde dieses Item in der vorliegenden Arbeit dem Aspekt Formen zugeordnet.

Bei Item 9 handelt es sich um ein partial credit Item, bei dem die Teilnehmenden die Energieumwandlung beim Skaten auf einer Halfpipe beschreiben sollen (vgl. Abbildung 20).

Laut dem Kodiermanual ist ein Erreichen der Maximalpunktzahl jedoch nur unter Berücksichtigung der Energieentwertungsprozesse möglich. Aus diesem Grund wird Item 9 in der vorliegenden Arbeit nicht mehr dem Aspekt Umwandlung zugeordnet, sondern dem Aspekt Entwertung.

9. Jonas fährt mit seinem Skateboard in einer Halfpipe ohne Schwung zu holen.



Welche Energieformen treten hier auf? Was passiert mit diesen Energien?

Abbildung 20: Item 9 aus dem Energietest von Michel (2018).

Bei der Datenanalyse werden die MC-Items dichotom mit nur einer korrekten Antwort pro Item gewertet, während die Wertung der offenen Antwortmöglichkeiten auf Grundlage eines angepassten Kodiermanuals durch partial credit erfolgt und doppelt kodiert wird.

6.2.2 Qualitative Daten: Interviews

Neben den quantitativen Daten werden von einer Subgruppe der Untersuchungsgruppen mittels halbstandardisierter Interviews ebenfalls qualitative Daten erhoben. Die Auswahl der untersuchten Schülerinnen und Schüler (kurz: Teilnehmenden) erfolgte nach Rücksprache mit der jeweiligen Lehrperson nach Schulleistung im Fach Physik, wobei die Auswahl eine ausgewogene Verteilung über das gesamte Leistungsspektrum abbilden soll.

Bei der qualitativen Datenerhebung mittels leitfadengestützter Interviews handelt es sich um ein etabliertes Instrument zur Erhebung des Energieverständnisses (vgl. bspw. Behle & Wilhelm, 2017; Boyes & Stainisstreet, 1990; Kesidou & Duit, 1993; Watts, 1983).

Innerhalb der Interviews sollen die Befragten vier Alltagssituationen aus energetischer Sicht beschreiben und dabei auf die Konzepte (1) *Formen*, (2) *Umwandlung*, (3) *Entwertung* und (4) *Erhaltung* Bezug nehmen (Interviewleitfaden adaptiert nach Lindner 2014; vgl. Anhang C.3.1, S. 275). Hierbei handelt es sich um einen Skater auf einer Halfpipe, einen fallenden Stein, ein rutschendes Kind sowie um ein Pendel, das an einem Motor befestigt ist (Fehlow, 2016, erweitert um das motorisierte Pendel, vgl. Anhang C.3.1, S. 275). Letzteres wird bei ein- sowie ausgeschaltetem Motor betrachtet. Es wurden demnach je zwei vergleichbare Vorgänge mit unterschiedlichem Kontext gewählt: der Skater und das Pendel als periodische Prozesse sowie der fallende Stein und das rutschende Kind als nicht-periodische Prozesse mit klar definiertem Ende. Das motorisierte Pendel grenzt sich durch den Energietransfer in das System von diesen Vorgängen ab. Darüber hinaus stellt dieses eine erhöhte Anforderung für die Schülerinnen und Schüler dar, da im Lehrgangsunterricht bei Umwandlungsprozessen ausschließlich Transfers aus dem System im Rahmen von Entwertungsvorgängen betrachtet wurden.

Die Konzeption der Interviewaufgaben ermöglicht somit eine Berücksichtigung des Einflusses des Kontextes: Es ist bekannt, dass die Anwendung wissenschaftlicher Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern eine Kontextabhängigkeit aufweist. Während Lernenden in bestimmten Kontexten die Anwendung wissenschaftlicher Vorstellungen gelingt, zeigen diese in anderen Kontexten nach wie vor Alltagsvorstellungen (vgl. bspw. Hardy et al., 2010).

Durch die Wahl der Alltagsszenarien wurde im Rahmen der Interviews nicht gesondert nach dem Aspekt des Energietransfers gefragt, da hier nur der Transfer im Rahmen des Entwurfsprozesses relevant ist. Dieser wird als Teil der Energieentwertung aufgefasst.

Eine Ausnahme bildet das motorisierte Pendel; hier muss der Energietransfer in das System berücksichtigt und zur Erklärung herangezogen werden. Aus Gründen der Einheitlichkeit, wurde jedoch auch hier nicht gesondert nach dem Energietransfer gefragt.

Legetechnik

Aufgrund der großen Abstraktheit des Energiekonzepts ist es denkbar, dass die Schülerinnen und Schüler Probleme mit der Verbalisierung ihrer Gedanken haben. Um zu vermeiden, dass sich daraus fehlerhafte Rückschlüsse über das zugrundeliegende Energieverständnis ergeben, wurde im Interview die sogenannte Legetechnik verwendet (Lindner, 2014). Dabei werden Kärtchen eingesetzt, die sich in Motiv und Größe voneinander unterscheiden. Sie repräsentieren die unterschiedlichen Energieformen sowie deren Mengen und ermöglichen halbquantitative Aussagen. Ursprünglich wurden hierzu kreisförmige Kärtchen eingesetzt, die in Viertelkreise untergliedert waren (vgl. Abbildung 21).

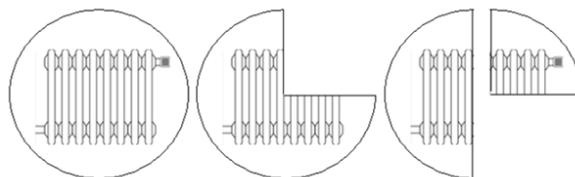


Abbildung 21: Verschiedene Abstufungen in der Mengendarstellung von innerer Energie.

Es konnte jedoch im Rahmen der Vorstudien beobachtet werden, dass die Lernenden häufig mehr als einen Vollkreis legen oder nur die Formen Höhen- und Bewegungsenergie einen Vollkreis bilden. Die innere Energie wurde zusätzlich zu diesem Vollkreis hinzugelegt (Fehlow, 2016). Eine Erklärung für dieses Vorgehen ist eine fachlich nicht korrekte Vorstellung zum Konzept der Energieerhaltung. Jedoch ist ebenso denkbar, dass die vorgegebene Einteilung der Kreise in Viertel bei drei verschiedenen Energieformen zu Schwierigkeiten beim Legen der Vorgänge führen.

Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit als Darstellungsform ein Balken gewählt, der eine einfach umzusetzende, kleinschrittigere Einteilung und einen niederschweligen visuellen Vergleich der Mengen der einzelnen Formen ermöglichen

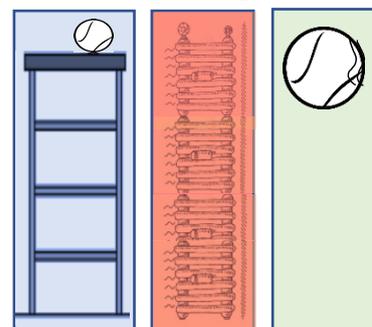


Abbildung 22: Legekärtchen des adaptierten Kontomodells. Blau: Höhenenergie, Rot: innere Energie, Grün: Bewegungsenergie.

soll (vgl. Abbildung 22). Zudem schließt diese Darstellung an das im Rahmen des Lehrgangs eingeführte adaptierte Kontomodell an, sodass der Umgang mit den Kärtchen bereits aus dem Unterricht bekannt ist (vgl. Kapitel 5.1).

Ziel der Aufforderung zum Anfertigen eines Energiekontomodells ist es, den Befragten die Visualisierung und Strukturierung ihrer Gedanken zu ermöglichen. Darüber hinaus bietet das Kontomodell im Interview einen zusätzlichen Gesprächsanlass.

Wie bereits erläutert, wird im Rahmen dieser Arbeit im Sinne des Mixed-Methods Designs bei den qualitativen Interviewdaten eine Kombination von Auswertungsverfahren angewendet: Die Interviewtranskripte werden über eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2000) sowohl quantitativ als auch qualitativ ausgewertet. Die jeweilige genaue Vorgehensweise wird im Folgenden erläutert.

1. Quantitative Analyse

Im Rahmen der quantitativen Auswertung erfolgte eine Bewertung des vorliegenden Energieverständnisses mittels eines von Lindner (2014) validierten Kodiermanuals, dem ein zweidimensionales Kompetenzentwicklungsmodell zugrunde liegt (vgl. K. Neumann et al., 2013, Kapitel 2.5). Das Modell wurde bezüglich der Komplexitätsdimension um die Stufe (0) *naives Wissen* erweitert, welches Alltagswissen ohne physikalische Bezüge mit eingeschränkter Tragfähigkeit umfasst, das einer empirischen Prüfung in unterschiedlichen Kontexten nicht standhält (siehe Abbildung 23; zum naiven Wissen vgl. Kleickmann, Hardy, Pollmeier & Möller, 2011). Ein Beispiel für eine Aussage, welche als *naives Wissen* kodiert würde, ist: „*Energieerhaltung heißt, dass man Energie erhält*“.

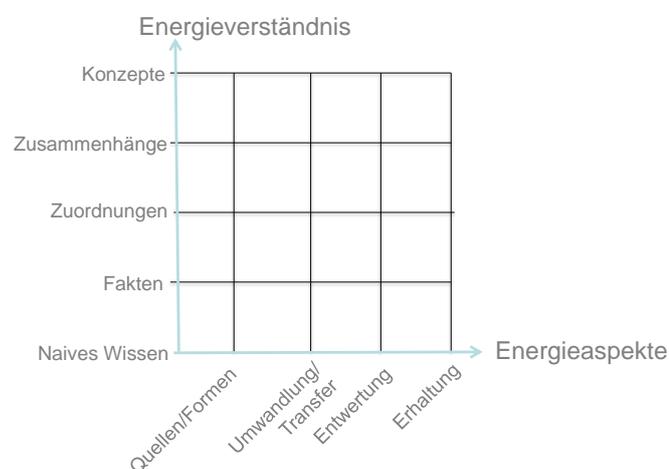
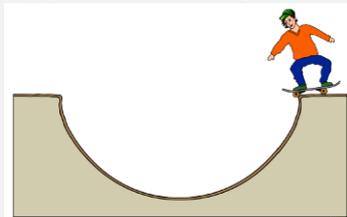


Abbildung 23: Erweitertes Kompetenzentwicklungsmodell (adaptiert von Neumann et al., 2012).

Die Komplexität ist hierbei ein Maß für das zugrundeliegende Energieverständnis innerhalb der jeweiligen Konzeptualisierung. Es erfolgt zunächst eine Zuordnung der Transkriptausschnitte zu einem der Aspekte der Energiequadrige sowie im Anschluss eine Einordnung in eine erreichte Komplexitätsstufe. Dabei werden den Stufen die Zahlen 0–4 zugeordnet. Tabelle 4 zeigt einen Auszug aus dem Kodiermanual der Aufgabe „Der Skater auf der Halfpipe“ für den Aspekt Entwertung.

Aufgabe 1: Der Skater auf der Halfpipe

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren.



Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

Tabelle 4: Auszug aus dem Kodiermanual der Aufgabe Skater für den Aspekt Entwertung.

Kategorie	Code	Beschreibung	Beispielaussage Skater
naives Wissen	0	Der oder die Teilnehmende zeigt unreflektiertes Erfahrungswissen ohne fachliche Bezüge	<i>Energieentwertung ist, wenn Energie entwertet wird.</i>
Fakten	1	Der oder die Teilnehmende gibt an, dass Energie entwertet werden kann und erläutert, was „entwertet“ bedeutet.	<i>Energie kann seinen Nutzen verlieren.</i>
Zuordnung	2	Der oder die Teilnehmende benennt Ursachen für die Entwertung von Energie.	<i>Wenn der Skater die Halfpipe herunterfährt, wandelt sich Höhenenergie in Bewegungsenergie um. Ein Teil der Energie wird jedoch durch Reibung / Luftwiderstand in innere Energie umgewandelt.</i>
Zusammenhänge	3	Der oder die Teilnehmende zeigt ein abstraktes Verständnis der Entwertung und beschreibt ebenfalls den Energietransport in die Umgebung.	<i>Ein Teil der Energie wird bei der Umwandlung von Höhen- in Bewegungsenergie durch Reibung in innere Energie umgewandelt. Dabei wird Energie an die Umgebung übertragen und führt dort ebenfalls zu einer Erhöhung der inneren Energie. Diese kann nicht mehr genutzt werden.</i>
Konzept	4	Der oder die Teilnehmende beschreibt in der Situation alle Umwandlungen mit ihren zugehörigen Entwertungen und nennt die phänomenologischen Auswirkungen der Entwertung in der konkreten Situation .	<i>Wenn der Skater die Halfpipe herunterfährt, wandelt sich Höhenenergie größtenteils in Bewegungsenergie und durch die Reibung des Skateboards mit der Halfpipe auch zu einem kleinen Teil in innere Energie um. Dabei wird Energie an die Umgebung übertragen und führt dort ebenfalls zur Erhöhung der inneren Energie. In der Umgebung verteilt sich die Energie und kann somit nicht mehr genutzt werden, weshalb der Skater nach dem Durchfahren der Halfpipe nicht mehr seine Anfangshöhe erreichen kann.</i>

Mithilfe des Manuals lässt sich die beispielhafte Aussage „[...] und die Höhenenergie nimmt ab und die Bewegungsenergie nimmt zu, aber durch die Reibung an den Rollen und an der Halfpipeline entsteht innere Energie und die verteilt sich in der Umgebung und so verliert er quasi Energie und er hört langsam auf zu schwingen.“ wie folgt kodieren: Die Aussage wird dem Aspekt Entwertung zugeordnet, da hier die Umwandlung von Energie in innere Energie aufgrund von Reibung beschrieben wird. Es wird in der Aussage Bezug auf die konkrete Situation genommen, da Elemente der Situation wie die Rollen bzw. die Halfpipeline benannt werden. Ebenfalls werden die Folgen der Energieentwertung für den gegebenen Vorgang beschrieben; der Skater hört auf zu schwingen. Aus diesem Grund wird diese Transskriptpassage der Kategorie 4 *Konzept* zugeordnet. Der Komplexitätswert, der den Teilnehmenden letztendlich zugeordnet wird, ist der Mittelwert der erreichten Komplexitäten über alle Interviewaufgaben. Das motorisierte Pendel wird bei eingeschaltetem Motor jedoch gesondert ausgewertet.

Diese Auswertung lässt durch den numerischen Charakter eine quantitative Analyse der Daten sowie eine Aussage über die im Mittel erreichte Komplexität zu. Damit wird durch die Transformation der vielschichtigen Daten eine Handhabbarkeit erreicht, die die Kommunikation von Beobachtungsmustern erleichtert. Darüber hinaus kann durch die Quantifizierung ein direkter Vergleich mit den quantitativen Daten des Energietests stattfinden, da ein entsprechender Referenzrahmen geschaffen wird. Jedoch gehen durch diese Auswertungsmethode vielschichtige Informationen über das zugrundeliegende Verständnis von Energieentwertung und -erhaltung verloren (Winkel et al., 2017); eine Aussage, inwiefern sich Unterschiede in den Aussagen der Teilnehmenden manifestieren, gelingt hierbei nicht. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls eine qualitative Analyse der Daten vorgenommen, durch die komplementäre Informationen gewonnen werden können. Dabei ist ein Ziel der quantitativen und qualitativen Analyse der Daten die gegenseitige Untermauerung der Ergebnisse (Vogl, 2017).

2. Qualitative Analyse:

Ziel der qualitativen Analyse der Daten ist es Äußerungen von Schülerinnen und Schülern zu identifizieren, die Auskunft über die Vorstellungen im Zusammenhang mit Energieentwertung und -erhaltung geben. Jedoch ist hier eine klare Unterscheidung zwischen den Schüleräußerungen und den dahinterstehenden Vorstellungen vorzunehmen, da „Schüleräußerungen nur selten [...] direkt eine Schülervorstellung aus[drücken]“ (Schecker, Wilhelm, Hopf & Duit, 2018, S. 9) Aus diesem Grund wird im Folgenden weitgehend von *Aussagen* gesprochen, die auf Vorstellungen hinweisen können. Dabei ist die Kenntnis der Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler auch mit Blick auf die Forschungsfragen von Bedeutung, da die Vorstellungen von Lernenden u. a. ihr Verständnis von einem Sachverhalt formen³⁸ (Schecker et al., 2018).

Bei der qualitativen Analyse ist vor allem von Interesse, inwiefern sich die Aussagen der Untersuchungsgruppen unterscheiden und mit welchem Ausprägungsgrad die jeweiligen Aussagen auftreten. Aufgrund des explorativen Charakters dieser Analyse erfolgt im Rahmen der Datenauswertung zunächst eine induktive Kategorienbildung nach Mayring (2000), wobei die Kategorien hier nicht theoriegeleitet erstellt, sondern induktiv aus dem Material abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang werden in den Interviewtranskripten aller Teilnehmenden zunächst die Passagen identifiziert, in denen sie sich über Energieentwertung bzw. Energieerhaltung äußern. Die innerhalb dieser Transkriptausschnitte wörtlichen Äußerungen der Teilnehmenden werden in eine verkürzte Aussage überführt. Diese verkürzte Aussage gibt die inhaltliche Bedeutung der Äußerung betreffend Entwertung oder Erhaltung wieder. Beispiele für eine solche überführte Aussage sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Beispiele für die Kategorienbildung im Rahmen der qualitativen Analyse.

Zitat	Überführte Aussage	Zusammengefasste Aussage
„[...] und am Ende, wenn er dann quasi am Ende der Rutsche angekommen ist, ist ja quasi gar keine Energie mehr da. So ist es glaube ich hier auch, wie bei dem Stein.“	Am Ende des Vorgangs gibt es keine Energie mehr	Die Energie wird verbraucht
Interviewer: „Und was passiert mit der Energie, wenn sie in der Luft ist?“ ZE1604: „Ich glaube, die existiert dann nicht mehr.“	In der Umgebung existiert die Energie nicht mehr	
MO0204: „Hier an dem Punkt, wenn das Kind von der Rutsche runter ist und sich dann nicht mehr bewegt. Dann ist alles verbraucht.“	Am Ende des Prozesses ist die Energie verbraucht	

³⁸ Neben den Vorstellungen wird das Verständnis ebenfalls bspw. durch das (Vor-)Wissen beeinflusst (Schecker et al., 2018).

Die überführten Aussagen werden weiter analysiert, indem inhaltlich ähnliche Aussagen zu einer Aussage zusammengefasst werden, sofern dies möglich ist. Beispielsweise haben die überführten Aussagen in Tabelle 5 gemein, dass der Situation am Ende keine Energie mehr zugeordnet wird. Diese Aussagen wurden unter der Aussage „Die Energie wird verbraucht“ zusammengefasst, welche die Abnahme der Menge betont³⁹. Im Anschluss wurden durch Clusterung der Aussagen die in Tabelle 6 aufgeführten Kategorien gebildet. In Anlehnung an Schecker et al. (2018) erfolgt hier eine Unterteilung in anknüpfungsfähige bzw. nicht anknüpfungsfähigen Vorstellungen, wobei hier im Zusammenhang mit den anknüpfungsfähigen Vorstellungen zusätzlich eine Abgrenzung der durch den Lehrgang intendierten Vorstellungen vorgenommen wird (vgl. Tabelle 6). Anhand dieser Vorgehensweise wird pro Untersuchungsgruppe ein Kategoriensystem für jede Aufgabe erstellt.

Tabelle 6: Erläuterungen zu den Kategoriebezeichnungen.

Kategorie	Erläuterung
Alltagssprachgebrauch / Erfahrungswissen	Dieser Kategorie werden Aussagen zugeordnet, in denen nicht direkt auf Energie Bezug genommen wird, aber dennoch Rückschlüsse über die Vorstellungen über Entwertung und Erhaltung zulassen.
nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Diese Aussagen sind für den Konzeptaufbau ungeeignet. Ein Beispiel ist der Energieverbrauch, der eine Abnahme der Menge der Gesamtenergie beschreibt und damit dem Mengenerhalt entgegensteht.
anknüpfungsfähige Vorstellung	Hierunter werden der Definition von Wilhelm und Schecker (2018) folgend „ausbaufähige Vorstellungen“ gefasst, die „zu physikalisch korrekten Vorstellungen“ weiterentwickelt werden können (ebd., S. 52).
Lehrgangsvorstellung	Auch diese Aussagen sind im oben genannten Sinne anknüpfungsfähig. Diese Aussagen werden jedoch als „Lehrgangsvorstellung“ bezeichnet, da es sich hierbei darüber hinaus um Vorstellungen handelt, die durch den Lehrgang „Entwertung mit Fokus auf Transfer“ intendiert sind.

Im Anschluss werden die Transkripte erneut nach dem erstellten Kategoriensystem codiert, indem die Aussagen der Teilnehmenden den überführten bzw. zusammengefassten Aussagen zugeordnet werden (induktiv-deduktive Vorgehensweise).

„Ein Lernender verfügt oft über mehrere, unterschiedliche Vorstellungen gleichzeitig. [...] In [...] Äußerungen zeigen sich Widersprüche, Sprünge und Wechsel in der Argumentation. Wird die Problemstellung geringfügig geändert, ergeben sich deutliche Änderungen in der Art der geäußerten Schülervorstellungen“ (Wilhelm & Schecker, 2018, S. 51). Für die Auswertung

³⁹ Überführte Aussagen, die nicht in einer Aussage zusammengefasst werden können, bleiben als einzelne Aussage stehen.

bedeutet dies neben der Koexistenz verschiedener Vorstellungen zu einem Alltagsszenario, dass die Vorstellungen ebenso durch den Kontext des Szenarios selbst beeinflusst werden können. Daher erfolgt die Auswertung für jedes Szenario gesondert.

Um Auskunft über den Ausprägungsgrad der Vorstellungen zu erhalten, werden die Aussagen in Anlehnung an Burde (2018) mittels dreistufiger Skala kodiert, die zwischen *tritt nicht auf* (0 =wird nicht geäußert), *tritt leicht auf* (0,5 = wird einmal geäußert) und *tritt verstärkt auf* (1 =wird mehr als einmal geäußert) unterscheidet.

6.2.3 Lernendenvariablen

Damit Unterschiede zwischen Untersuchungsgruppen auf das Treatment zurückgeführt werden können, muss vor der Untersuchung gewährleistet sein, dass die Stichproben hinsichtlich untersuchungsrelevanter Merkmale vergleichbar sind (Bortz & Döring, 2006, S. 524). Da die einzelnen Teilnehmenden aus schulorganisatorischen Gründen im Klassenverband verbleiben müssen, ermöglicht das Erheben von Lernendenvariablen einen Vergleich bezüglich dieser Merkmale (Krüger et al., 2014). Daher werden zusätzlich zum Energieverständnis als Lernendenvariablen das fachspezifische Interesse sowie die abstrakte Denkfähigkeit erhoben, die einen Einfluss auf den Lernerfolg haben können.

Fachspezifisches Interesse: Als Indikator für die intrinsische Lernmotivation wird in beiden Studien das fachspezifische Interesse abgefragt (Köller, Schnabel & Baumert, 2000). Dabei handelt es sich nach der Person-Gegenstandsrelation nach Krapp (1992) um das dispositionale Interesse. Hierfür wird eine Skala mit vierstufigen Antwortformat (1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme vollständig zu) genutzt, die interne Konsistenz (Cronbachs α) liegt bei $\alpha = .88$. Tabelle 7 zeigt ein Beispielitem.

Tabelle 7: Beispielitem zum fachspezifischen Interesse (Köller et al., 2000).

Fragestellung	Ich stimme nicht zu	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme zu
An einem physikalischen Problem zu knobeln, macht mir einfach Spaß	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kognitive Fähigkeiten (KFT): Zur Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten wird der KFT 4-13 (Heller & Perleth, 2000) eingesetzt, wobei die Skalen N1 und N2 genutzt werden. Bei diesen Skalen handelt es sich um nonverbale Skalen zum anschauungsgebundenen Denken, die Teilaspekte physikalischer Kompetenz wie beispielsweise das abstrakte Denken testen (Viering, 2012). Die Reliabilität dieser Skalen liegt für N1 bei $r = .92$ und für N2 bei $r = .93$ (Heller & Perleth, 2000).

6.2.4 Datenanalyse

Im Folgenden werden die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Datenanalyseverfahren zum Testen der in Kapitel 4.2 beschriebenen Forschungshypothesen vorgestellt. Dabei handelt es sich bei den verwendeten Verfahren vorwiegend um non-parametrische Verfahren, die sich dadurch auszeichnen, dass diese nicht der Voraussetzung der Normalverteilung bzw. der Varianzhomogenität bedürfen. In der Literatur wird häufig die Verwendung parametrischer Verfahren empfohlen, auch wenn die Voraussetzungen dieser Verfahren verletzt sind, da diese robust gegenüber Verletzungen der Voraussetzungen seien (Bühner, 2006). Aus diesem Grund werden die Daten ebenfalls jeweils mit dem parametrischen Testpendant analysiert, jedoch die Ergebnisse dieser Analyse ausschließlich berichtet, falls Unterschiede auftreten.

Signifikanz, Effektstärke und Teststärke

Das Testen von Unterschiedshypothesen geht mit der Entscheidung über die Annahme bzw. Ablehnung der Hypothese einher. Da für die Entscheidung jedoch nicht die Daten der gesamten Grundgesamtheit vorliegen, muss diese auf Grundlage einer Stichprobe aus der Grundgesamtheit getroffen werden. Das heißt, es liegen unvollständige Informationen vor, die zu Fehlentscheidungen führen können. Dabei werden zwei Fehlerarten unterschieden. Bei dem Fehler 1. Art handelt es sich um den α – Fehler, bei dem ein Unterschied angenommen wird, jedoch in der Grundgesamtheit tatsächlich kein Unterschied vorliegt. Andersherum kann jedoch auch eine Entscheidung für das Ablehnen eines Unterschieds getroffen werden, obwohl in der Grundgesamtheit ein Unterschied vorliegt. Dabei handelt es sich um den Fehler 2. Art, den β – Fehler. Bei der Analyse muss daher festgelegt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Risiko einer Fehlentscheidung eingegangen werden kann. Für den α – Fehler wird in der Literatur häufig ein Signifikanzniveau von 5% empfohlen. Die Akzeptanzgrenze dafür, irrtümlich die Alternativhypothese abzulehnen (β – Fehler), liegt üblicherweise bei 20% (vgl. bspw. Bühner, 2006). Diese Irrtumswahrscheinlichkeiten werden ebenfalls für die vorliegende Arbeit festgelegt.

Für die Entscheidung für oder gegen die Hypothese wird auf Basis dieser Daten eine Prüfgröße ermittelt, anhand derer die sogenannte Überschreitungswahrscheinlichkeit p bestimmt werden kann. Wenn der ermittelte p -Wert den α – Fehler überschreitet, muss die sogenannte Nullhypothese beibehalten werden. Diese nimmt an, dass in den erhobenen Daten kein systematischer Unterschied vorliegt. Ist jedoch $p \leq 0.05$, wird die

Nullhypothese abgelehnt und die Alternativhypothese angenommen: Die Daten weisen einen überzufälligen Unterschied auf, der als signifikant bezeichnet wird.

Um die praktische Bedeutung eines signifikanten Unterschieds beurteilen zu können, wird in der vorliegenden Arbeit zusätzlich die Effektstärke angegeben. Bei parametrischen Verfahren wird als Effektstärke üblicherweise Cohens d herangezogen. Liegt jedoch keine Normalverteilung der Daten vor, muss aufgrund fehlender Symmetrieeigenschaften die Effektstärke approximiert werden (Bühner, 2006). In der vorliegenden Arbeit wird hierfür folgende Näherung verwendet

$$w = \frac{z}{\sqrt{N}},$$

wobei z der z -Wert der z -Verteilung ist und N die Stichprobengröße angibt. Zur Bewertung des Effekts gelten die in Tabelle 8 aufgeführten Konventionen (Bühner, 2006), auf die sich bei der Beurteilung der Ergebnisse bezogen wird.

Tabelle 8: Konventionen zur Beurteilung der Effektstärke (Bühner, 2006).

	Effektstärke w	Cohens d
Kleiner Effekt	$w = 0,10$	$d = 0,20$
Moderater Effekt	$w = 0,30$	$d = 0,50$
Starker Effekt	$w = 0,50$	$d = 0,80$

Trotz eines signifikanten Unterschieds, der zum Ablehnen der Nullhypothese führt und der Kenntnis der Stärke des statistischen Effekts, bleibt das Risiko einen β –Fehler zu begehen; sich also fälschlicherweise für die Alternativhypothese zu entscheiden. Die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Entscheidung für die Alternativhypothese wird Teststärke genannt und durch $1-\beta$ angegeben. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von maximal 20% muss diese demnach größer oder gleich 80% sein. Kann der Effekt im Vorfeld einer Untersuchung bereits auf Grundlage von Vorstudien abgeschätzt werden, lässt sich anhand der festgelegten Teststärke die Größe der hierfür benötigten Stichprobe a priori ermitteln. Ist der Effekt jedoch unbekannt, muss die Teststärke post hoc bestimmt werden. Hierfür wird in der vorliegenden Arbeit das Programm G*Power genutzt.

Testverfahren zur Unterschiedsprüfung von zwei und mehr als zwei Gruppen

Nonparametrische Verfahren zur Unterschiedsprüfung werden auch als verteilungsfreie Verfahren bezeichnet, da diese keine Normalverteilung oder Varianzhomogenität der Daten voraussetzen. Während parametrische Verfahren die Symmetrieeigenschaften der Normalverteilung zur Prüfung von Mittelwertsunterschieden als zentrale Tendenzen

nutzen, sind bei verteilungsfreien Verfahren Kenngrößen wie der Mittelwert oder die Standardabweichung nicht direkt Gegenstand des statistischen Tests.

Zur Prüfung von Unterschiedshypothesen von zwei Gruppen wird bei abhängigen Stichproben der *Vorzeichen-Rang-Test von Wilcoxon* verwendet und für unabhängige Stichproben der *Mann-Whitney-U-Test*⁴⁰. In beiden Tests werden zur Analyse nicht die eigentlichen Daten verwendet, sondern den Messwerten Ränge zugewiesen. „Beim Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test geht es darum, die Veränderung zwischen zwei Messzeitpunkten auf Signifikanz zu testen“ (Bühner, 2006, S. 272), weshalb den Differenzen Rangplätze zugewiesen werden. Anhand der Rangsummen für positive und negative Differenzen wird die Prüfgröße z ermittelt. Beim U-Test erhält der geringste Wert den niedrigsten Rangplatz und wird aufsteigend den übrigen Werten unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit zugeordnet. Anhand der Rangsummen der Untersuchungsgruppen wird die Prüfgröße U ermittelt und im Anschluss z -standardisiert. Dieser z -Wert kann nun auf Signifikanz geprüft werden, indem er mit dem kritischen Wert der z -Verteilung verglichen wird. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit bei Unterschiedsprüfungen zwischen zwei Gruppen oder Zeitpunkten die z -Werte angegeben.

Sollen mehr als zwei Gruppen auf Unterschiede geprüft werden, wird bei unabhängigen Stichproben die Rangsummenvergleichsanalyse nach *Kruskal-Wallis* durchgeführt, bei der ebenfalls ein Vergleich von Rangplätzen stattfindet⁴¹. Es erfolgt die Zuweisung der Ränge ähnlich wie beim U-Testverfahren, wobei die empirische Prüfgröße des Kruskal Wallis Tests H_{emp} ist, was χ^2 entspricht. Diese wird zur Entscheidung über die Ablehnung der Nullhypothese herangezogen (Bühner, 2006).

Für abhängige Stichproben wird hier der *Friedman-Test* durchgeführt, der eine Erweiterung des Wilcoxon-Tests auf mehr als zwei Gruppen darstellt und Messzeitpunkte vergleicht⁴². Die Grundidee dieses Tests ist, bei jeder Person über die Messzeitpunkte Ränge zu vergeben (Bühner, 2006). Die Prüfgröße stellt auch hier χ^2 dar, weshalb diese bei beiden Tests angegeben wird.

Voraussetzungen der Verwendung der beschriebenen Tests ist die statistische Unabhängigkeit der Messungen voneinander. In der fachdidaktischen Forschung wird häufig zu

⁴⁰ Das parametrische Äquivalent ist der t-Test für unabhängige bzw. abhängige Stichproben.

⁴¹ Das parametrische Pendant dieses Verfahrens ist die ANOVA (Analysis of Variance) oder auch einfaktorische Varianzanalyse ohne Messwiederholung.

⁴² Das entsprechende parametrische Verfahren ist die einfaktorische Varianzanalyse mit Messwiederholung.

bedenken gegeben, das sich Schülerinnen und Schüler innerhalb der Klasse durch das gemeinsame Lernen und andere Interaktionen gegenseitig beeinflussen können und somit die Messungen innerhalb einer Klasse nicht mehr als unabhängig betrachtet werden können. Es könnte sich also eine Abhängigkeit des Verständnisses von der Klassenzugehörigkeit ergeben. Diese Problematik kann durch eine Mehrebenenanalyse gelöst werden, bei der von einer hierarchischen Datenstruktur ausgegangen wird. Dabei bilden die erste Ebene die Schülerinnen und Schüler und die zweite Ebene die jeweiligen Klassen. Empfohlen wird für dieses Verfahren allerdings eine minimale Stichprobengröße von $N = 30$ auf der Klassenebene, weshalb dieses Verfahren hier nicht angewendet werden kann, da hier $N < 30$ ist. Es erfolgt jedoch eine Kontrolle der individuellen Merkmale der Lernenden (vgl. Kapitel 6.2)

Die Datenerhebung erfolgt im **Mixed-Methods Design**, worunter in der vorliegenden Arbeit die **Kombination quantitativer und qualitativer Erhebungsmethoden** verstanden wird. Dabei werden bereits etablierte Erhebungsinstrumente genutzt: Die quantitativen Daten werden mittels eines Energietests erhoben, der das Verständnis für die Aspekte der Energiequadriga erfasst. Die qualitativen Daten werden durch halbstandardisierte Interviews erhoben, die ebenfalls auf diese Aspekte abzielen. Zusätzlich werden als Lernervariablen das fachspezifische Interesse sowie das anschauungsgebundene Denken kontrolliert. Die Kombination qualitativer und quantitativer Erhebungsmethoden ermöglicht es unterschiedliche Perspektiven auf den gleichen Forschungsgegenstand einzunehmen, die sich gegenseitig ergänzen können.

Ebenfalls wird in der vorliegenden Arbeit eine **Kombination der Auswertungsverfahren der qualitativen Daten gewählt**. Dabei werden die Daten zum einen mittels Kodiermanual quantifiziert und zum anderen durch eine induktiv-deduktive Vorgehensweise qualitativ ausgewertet. Durch diese Vorgehensweise wird eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den quantitativen Daten erzielt und es können komplementäre Informationen gewonnen werden.

7 Die Studie EmIR: Energieentwertung mit der IR-Kamera

7.1 Design der Studie EmIR

Ziel der Studie EmIR ist die Untersuchung

- der **Reproduzierbarkeit** der Ergebnisse aus den Vorstudien *Nachmittags-* und *Ferienforscher* in formeller Lernumgebung sowie
- des Einflusses des Mediums **IR-Kamera** auf das Verständnis für die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung, wenn diese innerhalb des Lehrgangs als zusätzliches Messinstrument eingesetzt wird.

Hierbei soll die IR-Kamera im entwickelten Lehrgang eingesetzt werden (vgl. Kapitel 5), dessen didaktische Konzeption den Einsatz der Kamera begünstigt. Um den Effekt der IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung innerhalb des entwickelten Lehrgangs untersuchen zu können, ist es erforderlich den Lehrgang unter Verwendung der IR-Kamera mit einem Lehrgang *ohne Einsatz der IR-Kamera* zu vergleichen (**Kontrollgruppendesign**). Für einen fairen Vergleich ist es notwendig, dass die neu entwickelte Lernumgebung nicht mit einer Lernumgebung verglichen wird, deren gestaltungsbezogenen fachdidaktischen Überlegungen unbekannt sind. Das bedeutet, dass ein fairer Vergleich nur mit einer „*ebenso gut durchdacht[en] neu entwickelt[en] Lernumgebung*“ (Theyßen, 2014, S. 68) möglich ist, welche abgesehen vom Medieneinsatz identische Lerngelegenheiten bietet. Aus diesem Grund wurde in der Studie EmIR zunächst bewusst auf eine mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera in den Lehr-Lern-Prozess verzichtet, um die für den Vergleich notwendige Variablenkontrolle vornehmen zu können. Die Interventionen sollen sich lediglich hinsichtlich der zusätzlichen Nutzung des Mediums IR-Kamera unterscheiden; Lernziele, Aufgabenstellungen und Lernhandlungen müssen identisch sein. Daher werden beide Gruppen in demselben entwickelten Lehrgang unterrichtet, nur dass eine Gruppe zum Experimentieren zusätzlich eine IR-Kamera nutzt. Insbesondere unterscheiden sich dabei die Arbeitsaufträge ausschließlich in der zusätzlichen Beobachtung der Experimente durch die IR-Kamera, wobei die Schülerinnen und Schüler in beiden Gruppen dieselben Experimente durchführen. Hierfür wurden spezielle Experimente entwickelt, die ebenfalls ohne die Verwendung der IR-Kamera Beobachtungsmöglichkeiten bieten, die als Evidenz für Energieentwertung gedeutet werden können. Beispielsweise kann bei geeigneter Wahl von zwei Klötzen unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit, die

eine schiefe Ebene hinabrutschen, ein visueller Vergleich der Geschwindigkeiten stattfinden. Ebenfalls wurden Zusatzhandlungen wie das Radieren über die Tischoberfläche durchgeführt, welches eine fühlbare Temperaturerhöhung von Radiergummi und Tischplatte zur Folge hat (vgl. Kapitel 5.2).

Bei Medienvergleichsstudien können Randvariablen wie beispielsweise Neuigkeitseffekte oder auch die Lehrpersonvariable den Lernerfolg beeinflussen. Dabei wird unter dem **Neuigkeitseffekt** der Einfluss des „neuen“ Mediums auf die Interessantheit des Lernangebots verstanden, womit die Intervention einen Eventcharakter erhält. Allerdings nimmt dieser Effekt mit der Gewöhnung ab (Kerres, 2003), weshalb dieser durch eine längerfristige Nutzung der Medien kontrolliert werden kann. Innerhalb des Lehrgangs wird die IR-Kamera in Kombination mit dem iPad insgesamt über 7 von 14 Doppelstunden genutzt, sodass hier bereits von einer längerfristigen Nutzung gesprochen werden kann. Darüber hinaus erfolgt in der ersten Doppelstunde bewusst in beiden Vergleichsgruppen eine Einführung der IR-Kamera als Messinstrument zur Temperaturbestimmung sowie im weiteren Verlauf eine punktuell Nutzung der iPads.

Die **Lehrpersonvariable** meint den Einfluss der Lehrperson auf die Lernwirksamkeit der Intervention, da diese unterschiedliche Einstellungen gegenüber dem zu vergleichenden Medium haben können. Diese Prädispositionen können den Lernerfolg beeinflussen. Zur Minimierung dieses Effekts kann nach Theyßen (2014) in beiden Vergleichsgruppen dieselbe Lehrperson eingesetzt werden.

Zusätzlich wird in dieser Studie der Unterricht videographiert, wobei den Aufzeichnungen zentrale Fragestellungen und Impulse der Lehrperson entnommen werden, um diese im Vergleichsunterricht einsetzen zu können.

Zur Untersuchung der Forschungsfragen 1 und 2 (vgl. Kapitel 4.1) wird die Studie im **Pretest-Posttest-Follow-Up-Design** durchgeführt, um eine eindeutige Aussage über den Effekt der IR-Kamera hinsichtlich des Energieverständnisses treffen zu können. In diesem Rahmen werden die Teilnehmenden vor der eigentlichen Intervention (T1), direkt im Anschluss (T2) sowie drei Monate später (T3) befragt (vgl. Abbildung 24). Der Pretest ermöglicht sowohl einen Vergleich der Gruppen hinsichtlich des Vorwissens als auch eine Aussage über den jeweiligen Lernzuwachs (vgl. bspw. Burde, 2018). Der Follow-Up-Test nach 3 Monaten lässt ebenfalls eine Aussage über einen längerfristigen Effekt zu. Dabei handelt es sich um einen in der Relation zur

Interventionslänge empfohlenen Zeitraum (Krüger et al., 2014). Zur Datenerhebung werden die in Kapitel 6.2 beschriebenen Testinstrumente verwendet.

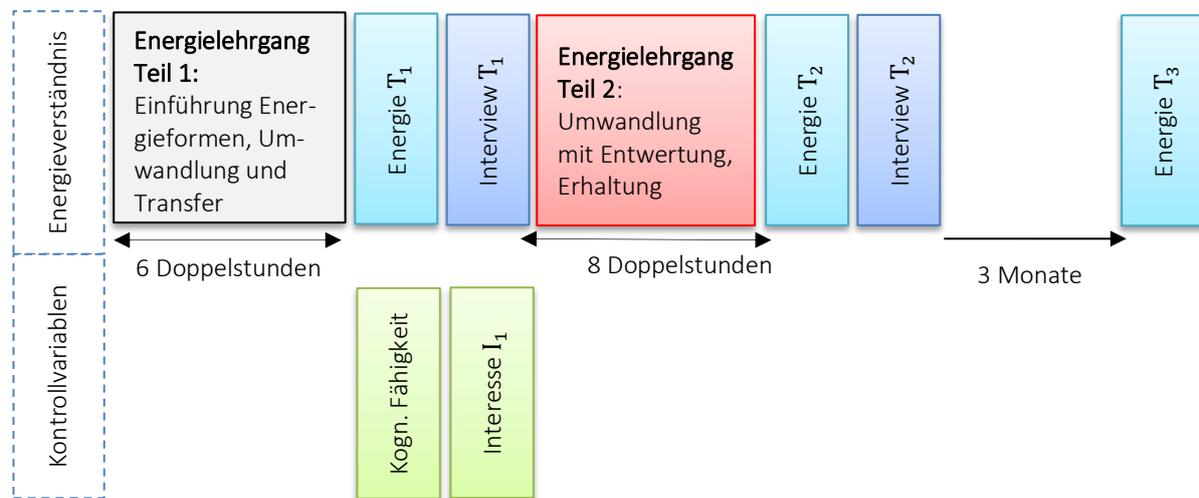


Abbildung 24: Ablaufplan und Datenerhebung von EmIR im Pretest-Posttest-Follow-Up-Design.

7.2 Durchführung und Stichprobenbeschreibung

Zur Untersuchung der Forschungsfragen 1 und 2 (vgl. Kapitel 4.1) wurde der Lehrgang in zwei 7. Klassen ($N = 48$) eines nds. Gymnasiums im Schuljahr 2016/17 von der Autorin als reguläre Physiklehrerin durchgeführt. Hierbei absolvierten beide Klassen denselben Lehrgang nach dem didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*, wobei die Gruppe *Lehrgang mit IR-Kamera (LmIR)* zum Experimentieren zusätzlich eine IR-Kamera nutzte. Demgegenüber arbeitete die Gruppe *Lehrgang ohne IR-Kamera (LoIR)* nach demselben Lehrgang, jedoch *ohne* IR-Kamera.

Die Zuordnung der Klassen zur Lehrperson wie auch die Auswahl einer Klasse bezüglich der Nutzung der IR-Kamera erfolgte zufällig. Die angegebene Stichprobengröße schließt nur Personen ein, die an allen Erhebungen teilgenommen haben. Die IR-Kamera wurde innerhalb des Lehrgangs lediglich als zusätzliches Messinstrument beim Experimentieren verwendet. Eine weitere mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera im Sinne einer Analyse der entstandenen Bild- bzw. Videoaufnahmen in zentralen Phasen hat bewusst nicht stattgefunden, um möglichst identische Lerngelegenheiten durch die Lehrgangsstruktur zu gewährleisten (vgl. Theyßen, 2014). Dies ermöglicht eine gezielte Untersuchung des Einflusses der IR-Kamera auf das Verständnis für Entwertung und Erhaltung.

Der Interventionszeitraum erstreckte sich von Dezember 2016 bis März 2017. Aus schulorganisatorischen Gründen konnte der zweite Teil der 14. Doppelstunde des Lehrgangs nicht

durchgeführt werden, stattdessen erfolgte die Datenerhebung zum Zeitpunkt T2 (vgl. Anhang A.16, S.257). Diese Vorgehensweise scheint mit Blick auf das Untersuchungsziel unproblematisch, da im Lehrgang bereits alle Aspekte der Energiequadriga thematisiert wurden und die Vertiefung für ein grundlegendes Verständnis der Aspekte nicht notwendig ist.

Tabelle 9: Ausschnitt aus der Kreuztabelle zum Studiendesign (vgl. Kapitel Tabelle 2).

	Lehrgang
ohne IR-Kamera	$N = 23$ $(m = 15, w = 8)$ Interview: $N = 8$
mit IR-Kamera	$N = 25$ $(m = 5, w = 20)$ Interview: $N = 8$

7.3 Ergebnisse der Studie EmIR

7.3.1 Analyse der Lernendenvariablen

7.3.1.1 Auswertung des anschauungsgebundenen Denkens

Mit dem KFT wird die Vergleichbarkeit der Klassen in Bezug auf die kognitiven Fähigkeiten der Lernenden kontrolliert. Zur Auswertung der Subskalen N1 und N2 werden die Daten dichotom mit nur einer richtigen Antwort pro Item gewertet. Sowohl für die Gruppe LoIR als auch für die Gruppe LmIR liegt der Median bei $Med = .88$ (vgl. Abbildung 25, links). Es ergibt sich kein signifikanter Gruppenunterschied bezüglich des Indikators für die kognitiven Fähigkeiten. Aufgrund der hohen Retest-Reliabilität des N-Teils des KFT ($r = .71$) ist eine Stabilität dieser Werte über den gesamten Testzeitraum anzunehmen (Heller & Perleth, 2000).

7.3.1.2 Auswertung des fachspezifischen Interesses

Auch in Bezug auf das fachspezifische Interesse sind zwischen den Gruppen keine signifikanten Unterschiede festzustellen (LoIR: Med = 2.4; LmiR: Med = 2.8, vgl. Abbildung 25, rechts).

Insgesamt ergibt sich damit eine Vergleichbarkeit der Gruppen hinsichtlich der kontrollierten personenbezogenen Merkmale.

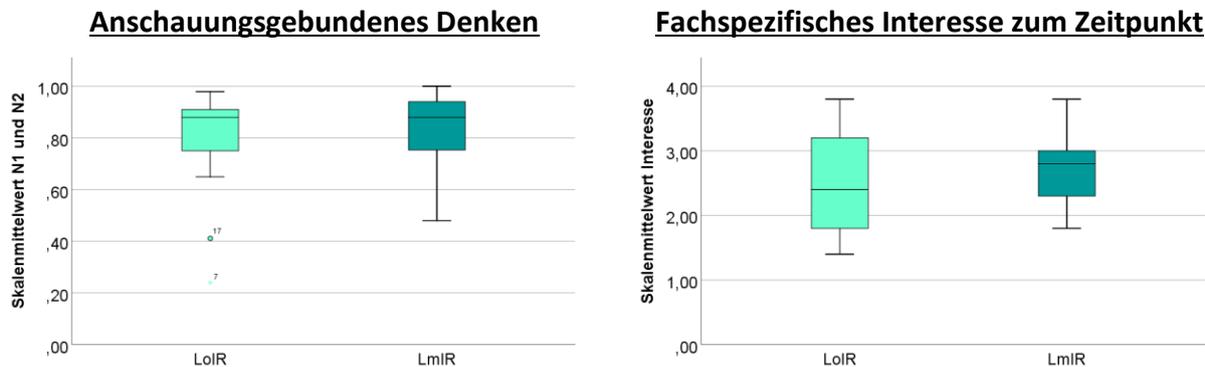


Abbildung 25: Gruppenvergleich der Skalenmittelwerte des anschauungsgebundenen Denkens (links) und des fachspezifischen Interesses im Fach Physik zum Testzeitpunkt T1 (rechts).

7.3.2 Ergebnisse zu den Forschungsfragen

Zur Analyse werden einerseits die Daten des **Energiestests** und andererseits die **Interviewdaten** herangezogen (vgl. Kapitel 6.2). Obwohl mittels der Erhebungsinstrumente ebenfalls Daten zu den Aspekten *Formen* sowie *Umwandlung und Transfer* erhoben wurden, wird dem Forschungsinteresse folgend nur von den Ergebnissen bezüglich der Aspekte *Entwertung* und *Erhaltung* ausführlicher berichtet (Forschungsfragen 1 und 2, siehe Abbildung 26, roter Kasten). Zusammenfassend liegt jedoch in beiden Gruppen ein mittleres bis hohes Verständnis der Aspekte *Formen* sowie *Umwandlung und Transfer* vor, das über den gesamten Testzeitraum stabil bleibt, sodass ebenfalls von einer Wirksamkeit des Lehrgangs im Hinblick auf diese Aspekte ausgegangen werden kann, unabhängig von der Nutzung der IR-Kamera (vgl. Abbildung 26).

**Ergebnisse des Energietests für die Aspekte der Energiequadrige
zu den Zeitpunkten T1 und T2**

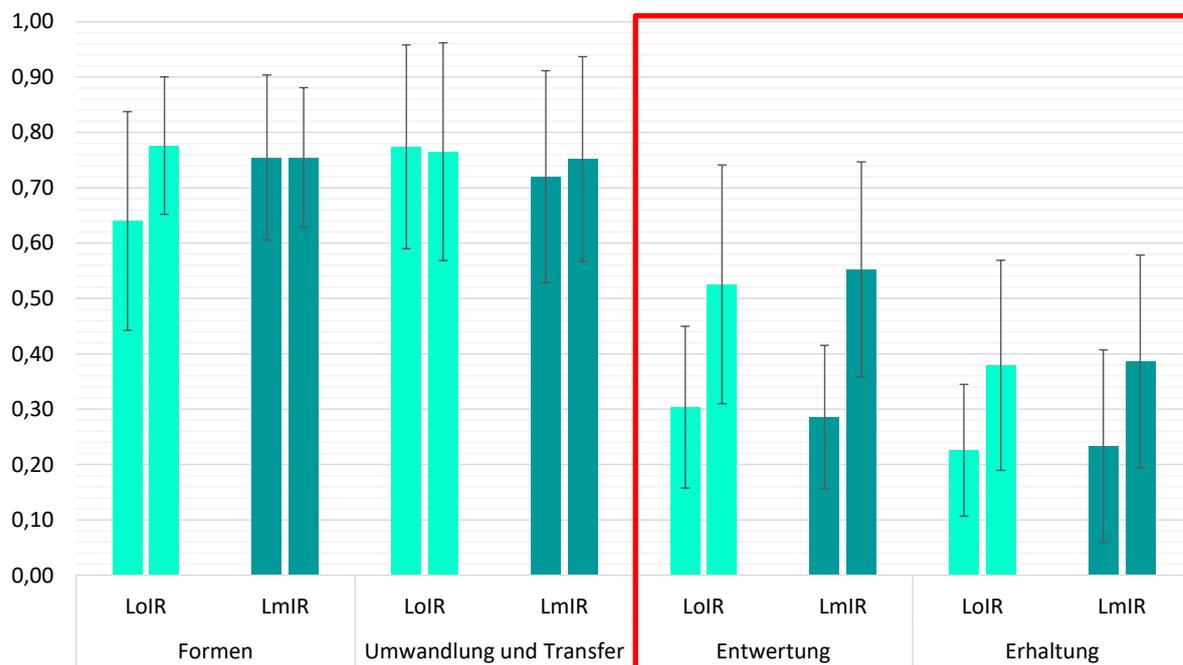


Abbildung 26: Balkendiagramm der Ergebnisse des Energietests für die Gruppen LoIR und LmIR; aufgetragen wurden die Skalenmittelwerte in Prozent.

7.3.2.1 Auswertung der Aspekte Entwertung und Erhaltung (Forschungsfrage 1)

1. Forschungsfrage 1: Inwiefern

- a) kann die in informeller Lernumgebung beobachtete Steigerung im Verständnis für **Energieentwertung** durch den **Lehrgang mit Visualisierung mittels IR-Kamera** in formeller Lernumgebung reproduziert werden?
- b) gelingt mit diesem **Einsatz der IR-Kamera im Lehrgang** eine „Anbahnung“ eines Verständnisses für **Energieerhaltung**?

Zur Untersuchung des Verständnisses für die Aspekte Entwertung und Erhaltung erfolgte die quantitative Auswertung des **Energietests** (Pretest (T1), Posttest (T2) und Follow-Up (T3)) sowie die quantitative und qualitative Auswertung der **Interviews**⁴³ (Pretest (T1) und Posttest (T2)).

⁴³ Im Rahmen der Auswertung der Interviews wurden 20% der Daten sowohl im Rahmen der quantitativen Analyse als auch bei der qualitativen Analyse von zwei verschiedenen Kodierern bewertet. Die Interrater-Reliabilität der Interviewdaten wird in Kapitel 8.4.1 berichtet.

Energietest

Aufgrund einer zu hohen Itemschwierigkeit (Lösungswahrscheinlichkeit < 20%) werden die Items 13 und 30 bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Dabei handelt es sich bei Item 13 um ein offenes Item, welches durch die Lehrgangsinhalte nicht hinreichend abgedeckt wurde und bei Item 30 um ein MC-Item, dessen Antwortmöglichkeiten nicht eindeutig dichotom sind. Im Zusammenhang mit der Bewertung der offenen Items wurden 20% der Daten aller Testzeitpunkte von zwei verschiedenen Kodierern auf Grundlage des in Kapitel 6.2.1 vorgestellten Kodiermanuals doppelkodiert und als Maß der Übereinstimmung Cohens Kappa bestimmt. Mit einer Interrater-Reliabilität von $\kappa = .83$ ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung (Wirtz & Kutschmann, 2007)⁴⁴.

In Bezug auf den Aspekt Entwertung kommt es sowohl für die Gruppe LoIR als auch für die Gruppe LmIR zu einer signifikanten Zunahme im Verständnis mit einem großen Effekt (LoIR: $z = -3.969$, $p = .00$, $w = .83$, $1-\beta = .99$; LmIR: $z = -4.229$, $p = .00$, $w = .85$, $1-\beta = .99$, vgl. Abbildung 27).

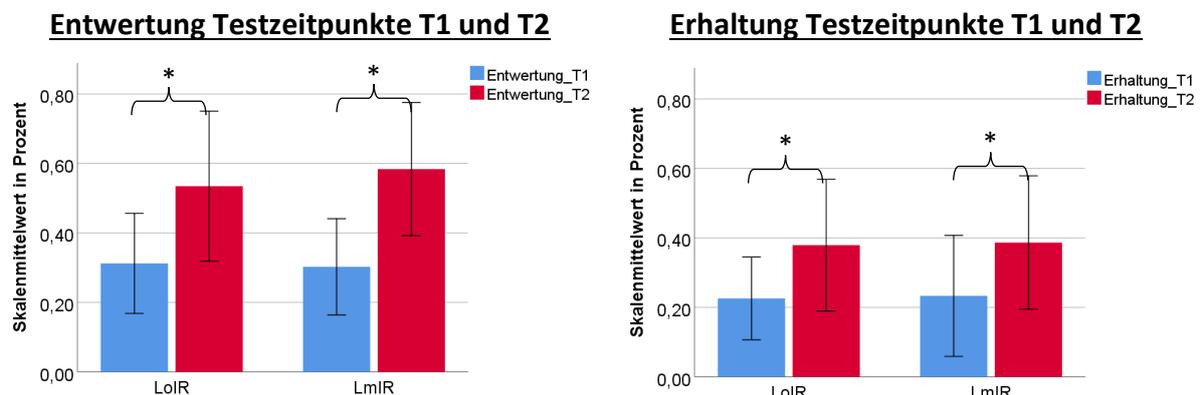


Abbildung 27: Vergleich der Testzeitpunkte T1 zu T2 auf Grundlage der Energietestdaten für die Aspekte Entwertung und Erhaltung in den Gruppen LoIR und LmIR, Skala in Prozent.

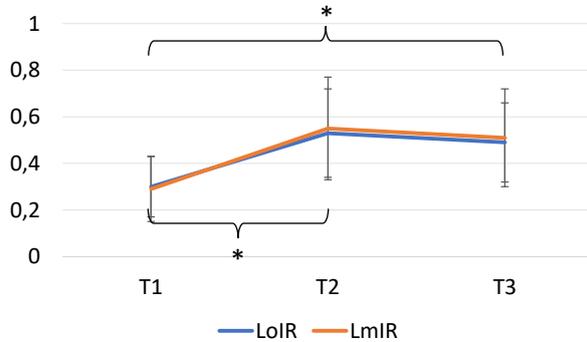
Auch die Datenanalyse für den Aspekt Erhaltung zeigt in beiden Gruppen einen signifikanten Zuwachs mit einem großen Effekt (LoIR: $z = -3.377$, $p = .001$, $w = .70$, $1-\beta = .99$; LmIR: $z = -2.616$, $p = .009$, $w = .52$, $1-\beta = .90$, vgl. Abbildung 27).

Die Analyse des Energietests über die drei Testzeitpunkte (Pretest T1, Posttest T2 und Follow-Up T3) ergibt in beiden Gruppen einen signifikanten Zuwachs im Verständnis für Entwertung und Erhaltung von T1 zu T2 sowie von T1 zu T3, sodass von einer längerfristigen Steigerung gesprochen werden kann (vgl. Abbildung 28). Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Follow-Up-Tests spricht, dass beide Gruppen im Zeitraum von T2 bis T3 von der Autorin im

⁴⁴ Eine Analyse der Reliabilität des Testinstruments erfolgt in Kapitel 8.4.1.

selben Elektriklehrgang unterrichtet wurden. In dieser Zeit erfolgte im Unterricht keine energetische Betrachtung der Vorgänge im elektrischen Stromkreis.

Entwertung Testzeitpunkte T1, T2 und T3



Erhaltung Testzeitpunkte T1, T2 und T3

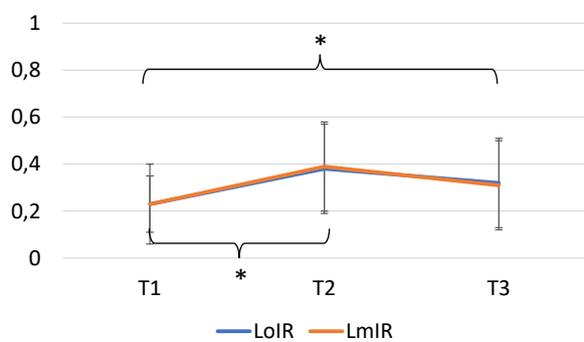
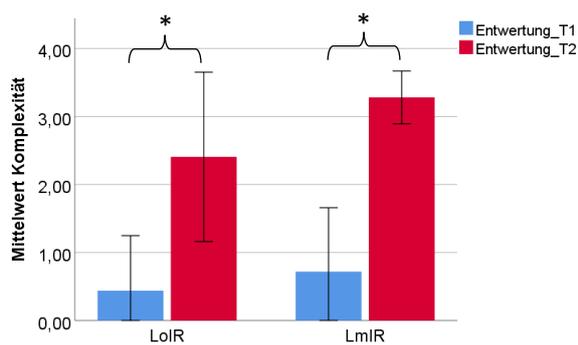


Abbildung 28: Vergleich der Testzeitpunkte T1, T2 und T3 auf Grundlage der Energietestdaten für die Aspekte Entwertung und Erhaltung in den Gruppen LoIR und LmIR, Skala in Prozent.

Interview

Die Auswertung der Interviews bestätigt die Ergebnisse des Energietests, wobei für den Aspekt Entwertung (LoIR: $z = -2.38$, $p = .018$, $w = .84$, $1-\beta = .99$; LmIR: $z = -2.52$, $p = .012$, $w = .89$, $1-\beta = .99$) und für Erhaltung (LoIR: $z = -2.21$, $p = .027$, $w = .78$, $1-\beta = .93$; LmIR: $z = -2.37$, $p = .018$, $w = .84$, $1-\beta = .99$) signifikante Steigerungen mit großem Effekt festzustellen sind (vgl. Abbildung 29).

Entwertung Testzeitpunkte T1 und T2



Erhaltung Testzeitpunkte T1 und T2

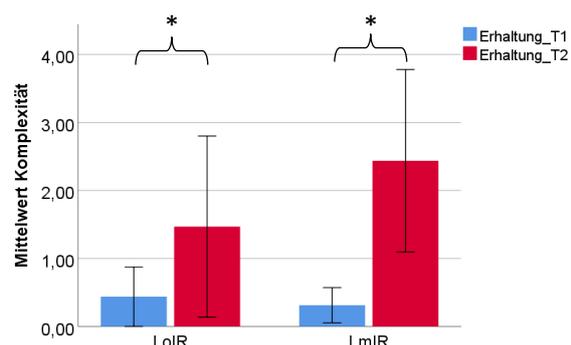


Abbildung 29: Vergleich der Testzeitpunkte T1 zu T2 auf Grundlage der Interviewdaten der Aspekte Entwertung und Erhaltung in den Gruppen LoIR und LmIR, Skala in Prozent.

Zusammengefasst lässt sich in beiden Gruppen eine signifikante Steigerung im Verständnis für Energieentwertung beobachten, sodass die Ergebnisse der Vorstudien in formeller Lernumgebung reproduziert werden konnten. Darüber hinaus gibt es Hinweise auf eine Anbahnung

eines Verständnisses für Energieerhaltung, da hier eine signifikante Steigerung im Verständnis von Pretest zu Posttest vorliegt.

7.3.2.2 Gruppenvergleich (Forschungsfrage 2)

Forschungsfrage 2:

*Inwiefern führt der zusätzliche **Einsatz der IR-Kamera im Lehrgang** zu einer Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung und -erhaltung **gegenüber dem Lehrgang ohne Visualisierung mittels die IR-Kamera**?*

Zur Untersuchung von Gruppenunterschieden im Verständnis für Entwertung und Erhaltung erfolgt eine quantitative Auswertung der Daten des **Energietests** sowie sowohl eine quantitative als auch qualitative Auswertung der **Interviews** (vgl. Kapitel 6.2).

Energietest

Für die Daten des **Energietests** wurden die Gruppen im Bereich der Energieentwertung und Energieerhaltung auf signifikante Unterschiede in den Ergebnissen von Pretest, Posttest und Follow-Up-Test geprüft. Weder im Bereich der Entwertung noch der Erhaltung konnten zu den Testzeitpunkten T1, T2 und T3 signifikante Gruppenunterschiede festgestellt werden.

Interview

1. Quantitative Analyse

Im Gruppenvergleich ist in den Ergebnissen der quantitativen Analyse der Interviews zum Testzeitpunkt T1 kein Gruppenunterschied feststellbar. Zum Testzeitpunkt T2 zeigt sich jedoch für den Aspekt Energieentwertung ein signifikanter Gruppenunterschied: Die Gruppe LmIR erreichte im Interview bei diesem Aspekt eine signifikant höhere Komplexität im Verständnis als die Gruppe LoIR mit einem mittleren Effekt ($z = -1.925$, $p = .027$, $w = .48$, $1-\beta = .67$, vgl. Abbildung 30).

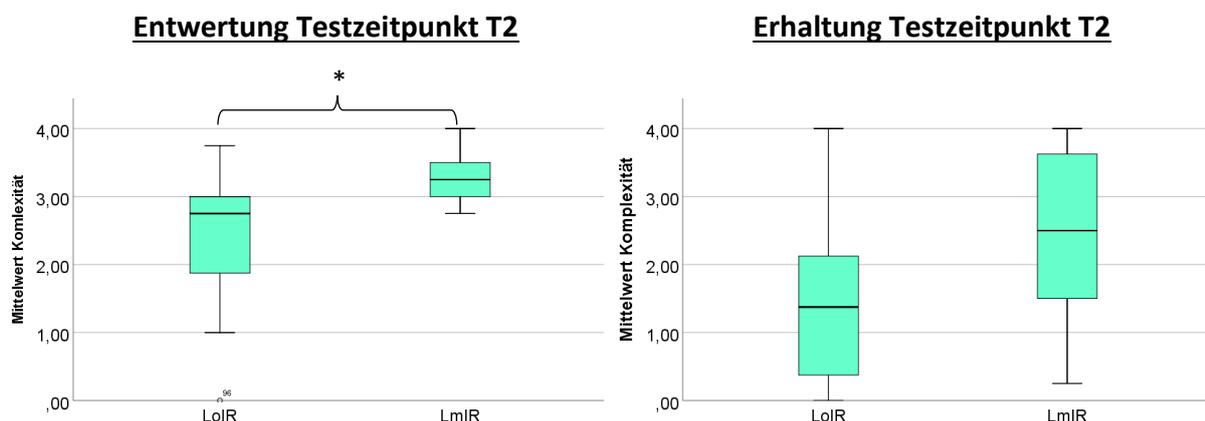


Abbildung 30: Gruppenvergleich der Aspekte Entwertung und Erhaltung auf Grundlage der Interviewdaten zum Zeitpunkt T2.

Während von der Gruppe LoIR bezüglich des Aspekts Entwertung im Mittel die Komplexität *Zuordnung bis Zusammenhänge* erreicht wurde, erzielte die Gruppe LmIR eine mittlere Komplexität im Bereich von *Zusammenhänge bis Konzept*. Herauszustellen ist, dass die interviewten Schülerinnen und Schüler keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Lernendenvariablen *kognitive Fähigkeit* bzw. *Interesse* aufweisen.

2. Qualitative Analyse

Im Rahmen der qualitativen Analyse werden die Interviewtranskripte nach der in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Vorgehensweise analysiert. Diese Vorgehensweise ermöglicht es anhand der zusammengefassten Aussagen Hinweise auf die Vorstellungen der Lernenden zu erhalten, über die sie nach Absolvieren des Energielehrgangs verfügen⁴⁵. So können Informationen darüber gewonnen werden, wie sich die im vorherigen Abschnitt festgestellten Gruppenunterschiede manifestieren⁴⁶.

Hierfür werden die interviewten Schülerinnen und Schüler hinsichtlich ihrer Leistungsstärke nach Einschätzung der Physiklehrkraft⁴⁷ den Kategorien *leistungsstark*, *mittelmäßig* und *schwach* zugeordnet. Die Schülercodes sind mittels Sternchen ihrer Kategorie entsprechend gekennzeichnet (vgl. Tabelle 10, Leistungsdifferenzierung durch Sternchen vgl. Burde, 2018). Die Einteilung der Teilnehmenden nach Leistungsstärke dient vorrangig der Sicherstellung, dass die interviewten Schülerinnen und Schüler das gesamte Leistungsspektrum repräsentieren. Aufgrund der Stichprobengröße wird jedoch keine leistungsdifferenzierte Auswertung wie beispielsweise eine Gegenüberstellung leistungsstarker und leistungsschwacher Schülerinnen und Schüler innerhalb oder zwischen den Gruppen vorgenommen. Daher wird im Folgenden nur in relevanten Zusammenhängen auf die Leistungsstärke eingegangen.

Tabelle 10: Zuordnung der Teilnehmenden zu den Kategorien leistungsstark, mittelmäßig und leistungsschwach.

Vergleichsgruppe	eingeschätzt als leistungsstark***	eingeschätzt als mittelmäßig**	eingeschätzt als schwach*
LoIR	LoIR_A*** LoIR_G***	LoIR_D** LoIR_E** LoIR_H**	LoIR_B* LoIR_C* LoIR_F*
LmIR	LmIR_E*** LmIR_G***	LmIR_A** LmIR_D** LmIR_B**	LmIR_C* LmIR_F* LmIR_H*

⁴⁵ Dabei müssen diese Vorstellungen jedoch nicht notwendigerweise durch den Lehrgang ausgebildet worden sein.

⁴⁶ Vgl. Kapitel 6.2.2.

⁴⁷ Dabei handelt es sich um die Autorin.

Im Rahmen der Analyse wurden die Aussagen der Untersuchungsgruppen *Lehrgang ohne IR-Kamera (LoIR)* und *Lehrgang mit IR-Kamera (LmIR)* miteinander verglichen. Wenn eine Aussage in beiden Untersuchungsgruppen identifiziert worden ist, wird diese **grau hinterlegt**.

#P = Anzahl der Personen

dAG = durchschnittlicher Ausprägungsgrad

fettgedruckt = $\#P \geq \frac{N}{2}$

graue Markierung: In beiden Gruppen identifizierte Aussage.

eingrückte Zeilen: Aussage ist in Verbindung mit der Aussage darüber zu sehen.

Weiterhin werden Angaben über die Anzahl der Teilnehmenden (**#P**) gemacht, bei denen die jeweilige Aussage kodiert wurde. **Fettgedruckte** Angaben markieren, dass die Aussage bei der Hälfte oder mehr Teilnehmenden der Untersuchungsgruppe identifiziert wurde. Ebenfalls wird der durchschnittliche Ausprägungsgrad (**dAG**) der Aussage bestimmt. Dieser gibt Auskunft darüber, wie häufig eine Aussage in den Interviewtranskripten kodiert wurde und ist untergliedert in „0 = tritt nicht auf“, „0,5 = tritt einmal auf“ und „1 = tritt verstärkt auf“ (vgl. Kapitel 6.2.2). Wird eine Aussage im Transkript einmal kodiert, wird ihr der Zahlenwert 0,5 zugeordnet, bei Mehrfachkodierung der Zahlenwert 1. Der durchschnittliche Ausprägungsgrad ergibt sich aus dem Mittelwert der Ausprägungen aller Teilnehmenden. Dabei entspricht 0,00 einem sehr geringen Ausprägungsgrad und 1,00 einem sehr hohen Ausprägungsgrad (zur Vorgehensweise vgl. Burde, 2018).

Allgemein ist anzumerken, dass die von den Schülerinnen und Schülern im Interview verwendete Fachsprache z.T. nicht mit der fachlichen korrekten Sicht auf Energie vereinbar ist. Beispielsweise wird hier von „Energie benutzen“ besprochen, Objekten Energie zugeschrieben und Energie als Erklärungsmechanismus herangezogen. Dabei handelt es sich teilweise um bekannte Schülervorstellungen. Da das Forschungsinteresse jedoch auf den Aussagen bzw. Vorstellungen zu Entwertung und Erhaltung liegt, wird dies nicht weiter analysiert.

Im Folgenden werden die Alltagsszenarien hinsichtlich der Erkenntnisse über das zugrundeliegende Verständnis für *Entwertung* sowie Verständnisschwierigkeiten in beiden Gruppen analysiert, wobei Gruppenunterschiede herausgestellt werden. Die Analyse des Aspekts Erhaltung findet sich im Anhang D.1.1, S.279 ff.

Entwertung

In der folgenden Analyse wird deutlich, dass sich der im Rahmen der quantitativen Analyse beobachtbare Gruppenunterschied bei den periodischen Prozessen in den Aussagen zu den phänomenologischen Auswirkungen der Energieentwertung manifestiert. Während die Gruppe LmIR die Abnahme der Amplituden durch den Energietransfer in die Umgebung oder

mit der Abnahme des Nutzwertes für den Vorgang begründet, stellen nur einzelne Teilnehmende der Gruppe LoIR einen solchen Zusammenhang her. Darüber hinaus zeigt sich in der Gruppe LoIR bei den nicht-periodischen Vorgängen eine Kontextabhängigkeit in den Aussagen zur Entwertung.

Begriffsverständnis

Bei den Untersuchungsgruppen lässt sich zunächst unabhängig von der Aufgabenstellung ein Unterschied im Verständnis des Begriffs *Entwertung* feststellen. Zwei Teilnehmende der Gruppe LoIR beschreiben den Begriff allgemein durch das Verschwinden von Energie bzw. einer Energieform, wie beispielsweise:

LoIR_D **: „Ja, die Höhenenergie wird entwertet. Weil es ist ja auch wieder immer weniger wird und irgendwann ist sie gar nicht mehr da. Also wenn der Stein dann auf dem Boden ist.“

Jedoch können bei Teilnehmenden ebenfalls Aussagen zur Energieentwertung identifiziert werden, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden konnten. Dies deutet auf ein nicht gefestigtes Verständnis vom Begriff Entwertung hin. In der Gruppe LmIR konnte dies hingegen nicht beobachtet werden.

Aufgabe 1: Der Skater auf der Halfpipe

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren. Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

In Tabelle 11 sind die im Rahmen von *Aufgabe 1* identifizierten Aussagen aufgelistet, die dem Aspekt Entwertung zugeordnet wurden. Es fällt auf, dass sich die Aussagen, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet wurden, in beiden Untersuchungsgruppen gleichen (graue Markierung). Während nahezu alle Teilnehmenden beim Skater die Umwandlung von Energie in innere Energie durch Reibung sowie die Übertragung von Energie an die Halfpipe beschreiben, bringen jedoch nur wenige leistungsstarke bis mittelmäßige Schülerinnen und Schüler diese Beschreibung in Einklang mit dem Skatevorgang und schließen auf eine Abnahme der Amplitude bzw. Bremsen des Skaters⁴⁸.

⁴⁸ Bei den Schüleraussagen wird die Entwertung als Ursache für die Beobachtung benannt. Allerdings kann ein Vorgang nicht durch eine energetische Beschreibung *erklärt* werden, vielmehr handelt es sich hierbei um eine Bilanzierung. Jedoch kann unter Kenntnis von Energieentwertung eine Abnahme der Amplitude bzw. der Geschwindigkeit des Skaters vorhergesagt werden.

Ausschließlich bei LoIR_F* konnte keine Aussage zur Energieentwertung identifiziert werden:

Interviewer: „Und wie sieht es mit innerer Energie bei diesem Vorgang aus?“

LoIR_F *: „Ich glaube nicht. Also da würde ich sagen, ich würde sagen: nein.“

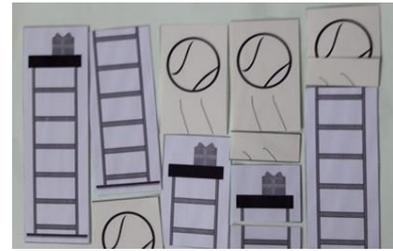


Abbildung 31: Kontomodell zu Aufgabe 1 des Teilnehmenden LoIR_F*.

Dies wird durch das zugehörige Kontomodell in Abbildung 31 bestätigt, bei dem die Umwandlung von Höhenenergie (blau) in Bewegungsenergie (grün) veranschaulicht wurde, die innere Energie jedoch nicht.

Tabelle 11: Identifizierte Schüleraussagen zum Aspekt Entwertung im Rahmen von Aufgabe 1.

Aufgabe 1: Entwertung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussagen	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprache- brauch/Erfahrungswissen	Im Laufe des Prozesses nimmt die Reibung zu.	2	0,13		
	Die Reibung hängt von der Geschwindigkeit ab.			2	0,13
	Beim Händereiben werden auch beide Hände warm.			3	0,19
	Durch Schwung holen würde der Skater die Ausgangshöhe wieder erreichen.			1	0,06
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Situative Betrachtung der inneren Energie ⁴⁹ .	1	0,06	1	0,13
	Innere Energie kann man nicht sehen, man sieht sie, indem sich etwas reibt.			1	0,06
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt,	6	0,69	7	0,81
	dadurch wird das Skateboard gebremst.	1	0,13	3	0,25
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	3	0,25	6	0,44
	Es wird (durch Reibung) Energie in die Umgebung abgegeben,	5	0,56	7	0,81
	dadurch bleibt der Skater irgendwann stehen.	1	0,06	2	0,13
	Die Energie verteilt sich in der Umgebung.	2	0,06	2	0,19
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.	3	0,25	7	0,81
	Der Skater kann die Energie nicht mehr nutzen.			3	0,25

⁴⁹ Hiermit ist gemeint, dass diese Schülerinnen und Schüler die innere Energie nicht addiert über den gesamten Prozess betrachten, sondern in jeder Situation die aktuelle Umwandlung bzw. den Transfer beschreiben.

Ein deutlicher Unterschied ergibt sich bei der Aussage „Energie kann ihren Nutzen verlieren“, wobei der durchschnittliche Ausprägungsgrad in der Untersuchungsgruppe LmIR deutlich höher liegt als in der Gruppe LoIR:

LmIR_B***: „[...] Also nicht verloren, also sie ist nicht weg, aber sie ist unbrauchbar. Das bedeutet halt, dass, wenn die innere Energie entsteht, dass sie - ja, sie geht ja dann an die Luft, also die Wärme geht an die Luft und dann ist sie nicht mehr nutzbar als Bewegungsenergie, ähm [überlegt] ... oder andere Energieformen, sondern sie ist einfach entwertet und nicht mehr nutzbar.“

Drei Teilnehmende dieser Gruppe äußern eine vergleichbare Erklärung und nehmen dabei Bezug auf die konkrete Situation des Skatens:

LmIR_E***: „[...] Die kann sich ja nicht einfach wieder in die Bewegungsenergie umwandeln und deswegen kann der Skater sie halt nicht mehr benutzen, um zu fahren. Und deswegen entwertet sich diese Energie.“

In beiden Untersuchungsgruppen wird die Umwandlung in innere Energie nicht wie üblich über den Prozesszeitraum summiert betrachtet, sondern erfolgt situativ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Skaters. Aus diesem Grund wird der Umgebung je nach Snapshot mehr oder weniger innere Energie zugordnet. Dies wird durch das Kontomodell in Abbildung 32 verdeutlicht. LmIR_E*** legt beim ersten Snapshot nur Höhenenergie, wobei diese im weiteren Verlauf sinkt, während der Anteil der Bewegungsenergie steigt. Außerdem wird sowohl dem Skater als auch der Umgebung innere Energie zugeordnet (rote Karten). Jedoch wird deutlich, dass die innere Energie, die der Umgebung zugeordnet wurde, mit der Zeit wieder abnimmt. Dies erklärt LmIR_E*** wie folgt:



Abbildung 32: Kontomodell der Aufgabe 1 von LmIR_E***.

LmIR_E***: „Wenn er sich nicht mehr bewegt, dann ist ja auch keine Bewegungsenergie. [...] Da kann er auch schwer an der Luft reiben, oder an der Halfpipe oder sonst wo. Da kann ja keine Wärme entstehen. Deswegen, aber es wird ja weniger, weil - Wärme ist ja nicht einfach kurz da und dann sofort wieder weg. Und... sondern kühlt erst ab. Und deswegen glaube ich, dass da noch ein bisschen innere Energie ist.“

Diese Betrachtungsweise wurde als anknüpfungsfähig eingestuft, da grundlegend ein Zusammenhang zwischen dem Prozess und der Folge der Temperaturerhöhung durch Reibung hergestellt wird. Der Begriff Umgebung wird jedoch auf die unmittelbare Nähe des Skaters bezogen und die Abnahme der inneren Energie der Umgebung durch Abkühlen erklärt. Der Vorgang des Abkühlens müsste in einem nächsten Schritt noch als Wärmetransport in der Umgebung erläutert werden. Daher wurde diese Aussage der Kategorie anknüpfungsfähige Vorstellung zugeordnet.

Zusammengefasst lassen sich in beiden Gruppen identische Aussagen finden, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet wurden. Jedoch ist der durchschnittliche Ausprägungsgrad dieser Aussagen bei den Teilnehmenden der Gruppe LmIR höher als in der Gruppe LoIR. Der größte Unterschied im Ausprägungsgrad ergibt sich bei der Aussage, dass die Menge innerer Energie im Laufe des Skatens zunehme, diese jedoch für den Vorgang keinen Nutzen mehr habe (vgl. Tabelle 11).

Aufgabe 2: Der fallende Stein

Du hebst einen Stein hoch und lässt ihn fallen. Was kannst du über die Energie des Steins sagen?

Im Vergleich zur ersten Aufgabe zeigt sich hier in den Aussagen ein inhomogeneres Bild: Während alle Teilnehmenden der Gruppe LmIR mit hohem durchschnittlichen Ausprägungsgrad beschreiben, dass während des Falls Energie in innere Energie umgewandelt wird, äußern dies nur wenige Teilnehmende der Gruppe LoIR (vgl. Tabelle 12). Drei Teilnehmende der Gruppe LoIR erläutern explizit, dass es aufgrund fehlender oder sehr geringer Reibung keine Umwandlung in innere Energie bei diesem Vorgang gäbe:

LoIR_D**: *„Weil da jetzt zum Beispiel keine Reibung ist. Weil sonst würde ich das so lassen.“*

LoIR_H**: *„Also meistens wird es ja irgendwie umgewandelt, aber es entsteht ja auch keine große Reibung d. h. es würde ja auch eigentlich nicht in innere Energie umgewandelt werden, deshalb bin ich mir da tatsächlich nicht sicher.“*

Diese Aussagen korrespondieren mit den angefertigten Kontomodellen der Teilnehmenden, in denen innere Energie nicht

berücksichtigt wird (vgl. Abbildung 33). Demgegenüber sind die Aussagen, die die Übertragung von Energie in die Umgebung betreffen, in beiden Gruppen hoch ausgeprägt. Zwei

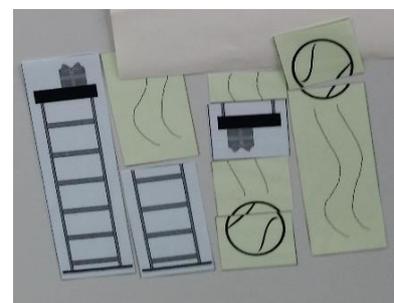


Abbildung 33: Beispielhaftes Kontomodell der Aufgabe 2 von LoIR_B*. Dem Vorgang wird keine innere Energie zugeordnet.

Teilnehmende der Gruppe LoIR beschreiben in diesem Zusammenhang einen „Transfer von Bewegungsenergie in die Umgebung“.

Insgesamt können nur wenige Teilnehmende der Gruppe LoIR den Umwandlungsprozess unter Berücksichtigung der Energieentwertung korrekt beschreiben. Dies gelingt jedoch allen Teilnehmenden der Gruppe LmIR. Darüber hinaus werden in dieser Gruppe quantitativ mehr und inhaltlich differenzierte Aussagen identifiziert, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden konnten. Dabei handelt es sich neben allgemeineren Aussagen zur Entwertung auch um Äußerungen, die sich direkt auf das vorgestellte Szenario beziehen.

Tabelle 12: Identifizierte Schüleraussagen zum Aspekt Entwertung im Rahmen von Aufgabe 2.

Aufgabe 2: Entwertung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
	Keine Vorstellung zum Bewegungsablauf.	1	0,00		
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Luftwiderstand wird der Stein gebremst.	1	0,06		
	Die Luftreibung erwärmt den Stein und die Luft.	2	0,06		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Hier gibt es keine innere Energie aufgrund geringer oder fehlender Reibung.	3	0,19		
	Die abgegebene Energie ist Bewegungsenergie.	2	0,19		
	Situative Betrachtung der inneren Energie.			2	0,25
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt.	3	0,38	8	0,88
	Energie wird (durch Reibung) in die Umgebung abgegeben,	6	0,69	8	0,81
	dann hat der Stein keine Energie mehr.	2	0,19		
	In der Umgebung verteilt sich die Energie.	3	0,19	1	0,06
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.	3	0,31	5	0,44
	Die Energie ist für den Stein nicht mehr nutzbar.			2	0,19
	Beim Aufprall wird die Energie auf den Boden übertragen.			2	0,13
	Auf dem Boden hat der Stein nur noch innere Energie.			5	0,38
	Die Menge an innerer Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.			3	0,19
	Durch die Reibung erwärmen sich die Luft und der Stein, d. h. Energie wird in innere Energie umgewandelt.			2	0,31

Aufgabe 3: Das rutschende Kind

Ein Kind sitzt oben auf einer Rutsche und möchte gleich losrutschen. Was kannst du über die Energie des Kindes sagen?

Im Zusammenhang mit diesem Szenario beschreiben alle Teilnehmenden der Gruppe LmIR die Umwandlung von Energie in innere Energie und den Transfer von Energie in die Umgebung aufgrund von Reibung zwischen Kind und Rutsche (vgl. Tabelle 13):

LmIR_C*: „Die [innere Energie] entsteht durch die Reibung des Kindes an der Rutsche und wird an die Umgebung abgegeben.“

Diese Aussagen werden durch die Kontomodelle der Teilnehmenden gestützt, die neben der Umwandlung von Höhen- in Bewegungsenergie einen immer größeren Anteil an innerer Energie abbilden (vgl. Abbildung 34, links).

Auch die Teilnehmenden der Gruppe LoIR beschreiben einen Umwandlungsprozess von Höhenenergie in Bewegungs- und innere Energie, jedoch äußern sich nur die Hälfte der Teilnehmenden über einen Energietransfer in die Umgebung. LoIR_F* erkennt zwar eine Ähnlichkeit des Szenarios mit Aufgabe 2, ordnet jedoch dem Vorgang des Rutschens keine innere Energie zu (vgl. Abbildung 34, rechts).

In beiden Gruppen beziehen nur einzelne Teilnehmende den Energietransfer auf die konkrete Situation und stellen einen Zusammenhang zwischen dem Energietransfer und der Abnahme der Rutschgeschwindigkeit des Kindes her.

Insgesamt weisen die Aussagen der Gruppe LmIR, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet wurden, einen höheren durchschnittlichen Ausprägungsgrad auf als die der Gruppe LoIR. Zudem lassen sich auch hier vereinzelt inhaltlich differenziertere Aussagen identifizieren, die im Einklang mit den Lehrgangsinhalten stehen.

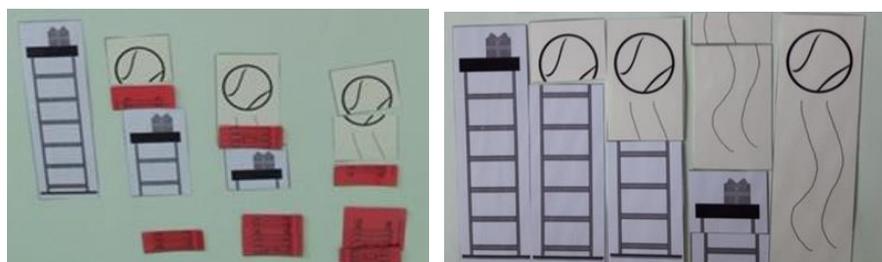


Abbildung 34: Links: Beispiel eines Kontomodells, welches den Umwandlungsprozess in innere Energie und den Energietransfer in die Umgebung darstellt (LmIR_D**). Rechts: Kontomodell zu Aufgabe 3 von LoIR_F*, in dem die innere Energie nicht berücksichtigt ist.

Tabelle 13: Identifizierte Aussagen zur Entwertung in Rahmen von Aufgabe 3.

Aufgabe 3: Entwertung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprache- brauch/Erfahrungs- wissen	Situative Betrachtung der inneren Energie	1	0,06		
Nicht anknüpfungsfä- hige Vorstellungen	Bei diesem Vorgang gibt es keine innere Ener- gie.	1	0,06		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Durch die Reibung hat die Rutsche mehr Ener- gie, diese wird nicht abgeben.	1	0,06		
	Beim Händereiben werden auch beide Hände warm.			1	0,06
Lehrgangsvorstellun- gen	Energie wird (durch Reibung) in innere Ener- gie umgewandelt,	7	0,75	8	0,88
	dadurch wird das Kind bremst	1	0,06		
	Am Ende der Rutsche gibt es nur noch innere Energie.	2	0,13	3	0,25
	Energie wird (durch Reibung) an die Umge- bung abgegeben,	4	0,38	8	0,94
	dadurch wird das Kind gebremst.			1	0,06
	Durch die Reibung wird die Rutsche erwärmt, daher wird innere Energie in die Umgebung abgegeben.	1	0,13	1	0,13
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.	3	0,19	4	0,38
	Die Energie kann das Kind nicht mehr zum Rutschen gebrauchen.			2	0,25
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	3	0,19	4	0,31
	Die Energie verteilt sich in der Umgebung			1	0,13

Aufgabe 4a: Das Pendel ohne Motor

Ein Pendel ist an einem Motor befestigt. Du lenkst es aus und lässt es los. Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor ausgeschaltet ist?

Bei diesem Szenario lassen sich ebenfalls in beiden Gruppen Überschneidungen bei den Aussagen finden, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden können (vgl. Tabelle 14).

Auch hier beschreibt die Mehrheit der Teilnehmenden der Gruppe LmIR den periodischen Umwandlungsprozess unter Berücksichtigung der Umwandlung von Energie in innere Energie und einen Energietransfer vom Pendel zur Luft bzw. zur Aufhängung mit einem hohen durchschnittlichen Ausprägungsgrad von 0,81. Darüber hinaus begründen diese Schülerinnen und Schüler die Abnahme der Pendelamplitude mithilfe des Energietransfers in der konkreten Situation:

LmIR_C*: „Und irgendwann hört das Pendel auf zu schwingen, weil immer mehr Energie halt... an die Umgebung abgegeben wird.“

Tabelle 14: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 4a.

Aufgabe 4a): Entwertung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Die Höhe nimmt aufgrund des fehlenden Schwungs ab.	2	0,13		
	Durch die Reibung stoppt der Vorgang.			1	0,06
	Man würde Wärme spüren, wenn man die Aufhängung berührt.	2	0,19		
	Unsicherheit bei der Zuordnung der Energieform zu Prozessende.	1	0,06		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Hier gibt es keine innere Energie (aufgrund fehlender Reibung).	2	0,13		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Situative Betrachtung der inneren Energie	1	0,06		
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt.	6	0,63	8	0,81
	Am Ende des Prozesses ist nur noch innere Energie vorhanden.			2	0,19
	Die Menge an innerer Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	1	0,06	2	0,19
	Energie wird (durch Reibung) in an die Luft /Aufhängung abgegeben,	5	0,56	7	0,81
	deshalb schwingt das Pendel aus/ nicht mehr hoch.	1	0,13	6	0,38
	Energie kann ihren Nutzen verlieren,			2	0,19
	für das Pendel.			2	0,13

Auch in der Gruppe LoIR werden Aussagen zur Energieumwandlung in innere Energie und Energietransfer mit erhöhtem durchschnittlicher Ausprägungsgrad getroffen. Jedoch bringt nur ein*e Teilnehmende*r die Abnahme der Pendelamplitude in Zusammenhang mit der Umwandlung von Energie in innere Energie. Zwei Teilnehmende stellen aufgrund fehlender Reibung heraus, dass beim Pendel keine Umwandlung in innere Energie auftritt und nennen als Ursache für die Abnahme der Pendelamplitude den fehlenden Schwung, wobei es sich um eine eher intuitive Erklärung handelt:

Interviewer: „Warum hört es auf?“

LoIR_B*: „Weil es keinen Schwung mehr hat.“

Aufgabe 4b: Das motorisierte Pendel

Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor eingeschaltet ist?

Beim motorisierten Pendel handelt es sich um eine Aufgabe mit erhöhtem Anforderungsniveau, da hier während des Vorgangs ein Energietransfer in das System stattfindet. Die Aussagen, die im Zusammenhang mit diesem Szenario exzerpiert werden konnten, können Tabelle 15 entnommen werden.

Nur zwei Teilnehmende der Gruppe LoIR beschreiben eine Umwandlung von Energie in innere Energie trotz Motor. Diese stellen bezüglich der Entwertung keinen Unterschied zwischen dem Pendel mit und ohne Motor fest:

*LoIR_E**:* „Also ist genauso wie hier, nur dass es halt nicht wieder aufhört und es reibt sich ja auch, weil es wieder schwingt, dann entsteht da ja auch trotzdem innere Energie, ja.“

Allerdings konnten bei keiner*keinem Teilnehmenden Aussagen zum Energietransfer aus dem System Pendel identifiziert werden.

Bei der Gruppe LmIR beschreiben mehr als die Hälfte der Teilnehmenden erneut den Umwandlungsprozess des Pendels ohne Motor unter Berücksichtigung der inneren Energie und des Transfers aus dem System bei einem durchschnittlichen Ausprägungsgrad von 0,5. Jedoch führte diese Feststellung bei einigen Teilnehmenden zu einem kognitiven Konflikt, da sie keinen Zusammenhang zwischen ihrem Kontomodell und der Pendelamplitude herstellen können:

*LmIR_E***:* „Aber trotzdem muss es ja innere Energie haben, also muss man irgendwie Höhenenergie wieder wegnehmen und dafür innere Energie nehmen. Nämlich, die wird ja immer mehr. Also, ich weiß jetzt nicht wieso das Pendel genauso hoch ist, wie am Anfang dann wieder...“

Tabelle 15: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 4b.

Aufgabe 4b): Entwertung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Motor hat das Pendel überall dieselbe Geschwindigkeit.	1	0,06		
	Man würde Wärme spüren, wenn man die Aufhängung berührt.	1	0,06		
	Hier gibt es keine Reibung.	1	0,06		
Kognitiver Konflikt	Es wird auch mit dem Motor Energie in die Umgebung abgegeben, aber das Pendel erreicht trotzdem wieder dieselbe Höhe, das verstehe ich nicht.	1	0,13	3	0,25
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Die Energie bleibt nutzbar, da das Pendel immer weiter schwingt.			1	0,13
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Die vom Motor benutzbare Energie wird weniger.			2	0,06
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt.	2	0,19	4	0,31
	Energie wird an die Umgebung übertragen.			6	0,50
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.			2	0,13
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	2	0,13	1	0,13
	Durch den Motor wird die innere Energie ausgeglichen.	1	0,06	1	0,13

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Aspekt Entwertung wurden in beiden Gruppen insgesamt eine Vielzahl an Aussagen identifiziert, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellung* zugeordnet werden können.

Im Zusammenhang mit den periodischen Prozessen der Aufgaben 1 und 4a beschreiben beide Gruppen die Umwandlung von Energie in innere Energie sowie einen Energietransfer in die Umgebung. Unterschiede ergeben sich in der Bezugnahme auf die konkrete Situation. Während die Gruppe LmIR die Abnahme der Amplituden durch den Energietransfer in die Umgebung oder der Abnahme des Nutzwertes für den Vorgang begründet, stellt die Gruppe LoIR nur vereinzelt einen solchen Zusammenhang her.

Bei den nicht-periodischen Vorgängen mit klar definiertem Ende ergeben sich Unterschiede hinsichtlich des Kontextes. Während in der Gruppe LoIR beim fallenden Stein nur wenige Teilnehmende einen Umwandlungsprozess in innere Energie beschreiben, erläutern dies beim Rutschvorgang jedoch nahezu alle Teilnehmenden. Im Hinblick auf den Energietransfer ergibt sich ein anderes Bild: Im Zusammenhang mit dem fallenden Stein beschreiben alle

Teilnehmenden der Gruppe LoIR beim Aufprall einen Energietransfer vom Stein zum Boden, jedoch nur die Hälfte der Teilnehmenden erwähnt diesen Transfer beim Rutschen. Dies deutet bei der Gruppe LoIR auf eine Kontextabhängigkeit des Verständnisses für Energieentwertung hin.

Unabhängig vom Kontext beschreiben dagegen alle Teilnehmenden der Gruppe LmIR die stattfindenden Energieentwertungsvorgänge. In beiden Gruppen äußern sich sowohl beim Rutschen als auch beim fallenden Stein nur wenige Teilnehmende zu den Folgen der Entwertung für den Umwandlungsprozess. Beim Szenario des motorisierten Pendels beschreiben die Hälfte der Teilnehmenden der Gruppe LmIR einen Entwertungsvorgang, geraten jedoch teilweise aufgrund der nicht abnehmenden Pendelamplitude in einen kognitiven Konflikt, da sie diese nicht in Einklang mit ihren Überlegungen zur Energieentwertung bringen konnten. Demgegenüber bringen nur einzelne Teilnehmende der Gruppe LoIR diesen Vorgang mit Energieentwertung in Verbindung.

Bezüglich Energieerhaltung bleiben die Aussagen in beiden Gruppen eher auf allgemeiner Ebene in der Form „Die Energiemenge bleibt immer gleich“ oder „Energie kann nur umgewandelt werden“ und beziehen sich somit nicht auf die konkreten Szenarien (vgl. Anhang D.1.1). Bei den Aufgaben 3 und 4a konnten in der Gruppe LoIR bei einem Drittel der Teilnehmenden Aussagen zum Energieverbrauch identifiziert werden, wobei in der Gruppe LmIR auch einzelne Teilnehmende von Energieverbrauch sprechen.

7.3.2.3 Beobachtete Herausforderungen und Schlussfolgerungen für Einsatz der Infrarotkamera im entwickelten Lehrgang

Wie bereits in den Vorstudien zeigte sich auch im Rahmen der Studie EmIR bei den Schülerinnen und Schülern ein intuitiver Umgang hinsichtlich der Bedienung der IR-Kamera. Alle Schülerinnen und Schüler waren nach kurzer Zeit bezüglich der technischen Handhabung handlungsfähig.

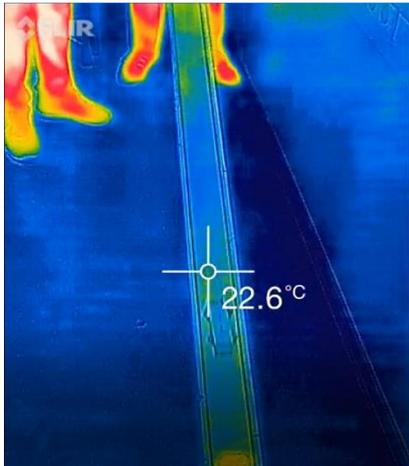


Abbildung 35: IR-Bild einer Schülergruppe beim Experiment „Wagen auf schiefer Ebene“ der 9. Doppelstunde (Einführung in die Energieentwertung).

Jedoch konnten nur wenige Schülerinnen und Schüler mittels der IR-Kamera aussagekräftiges IR-Bildmaterial erstellen, das als Evidenz für Energieentwertungsprozesse herangezogen werden kann. Eine der Hauptursachen für diese Schwierigkeiten war, dass sich während des Experimentierens im Beobachtungsbereich ganze Körper bzw. Körperteile von Mitschülerinnen und Mitschülern befanden. Da die Körpertemperatur häufig die höchste Temperatur im Beobachtungsbereich war, wurde von der IR-Kamera eine automatische Skalenanpassung vorgenommen. Dies hatte zur Folge, dass das eigentliche Phänomen nicht mehr im Vordergrund

stand oder eine Beobachtung der Temperaturerhöhung nicht mehr möglich war. Beispielsweise zeigt Abbildung 35 ein von einer Schülergruppe aufgenommenes IR-Bild eines Wagens, der eine Rampe hinunterrutscht (vgl. 9. Doppelstunde, Kapitel A.11). Durch die dynamische Anpassung der Skala werden die Beine der Lernenden als Objekt mit der höchsten Temperatur rot skaliert. Demgegenüber ist die durch die Reibung verursachte geringere Temperaturerhöhung von Rampe und Wagendach nicht mehr deutlich erkennbar.

Eine weitere Schwierigkeit stellte der durch Körperkontakt verursachte Wärmetransport zum Experimentiermaterial dar, da die Objekte infolgedessen von vornherein rot skaliert dargestellt wurden.

Im Zusammenhang mit der qualitativen Auswertung der Interviews wird deutlich, dass die Gruppe LmIR die mit der Kamera gemachten Erfahrungen und Beobachtungen nicht zum Argumentieren heranzieht. Keiner der Teilnehmenden nimmt in den Interviews Bezug auf die IR-Kamera oder IR-Bildmaterial. Dies kann darauf hindeuten, dass bei den Schülerinnen und Schülern keine Bedeutungszuweisung des IR-Bildmaterials als Evidenz für Energieentwertung

bzw. Energietransfer stattgefunden hat und der durch das IR-Bildmaterial angestrebte Lernprozess nicht in gewünschter Weise angeregt wurde.

Ursache hierfür können beispielsweise Probleme bei der Interpretation des IR-Bildmaterials sein, da im Unterricht keine gemeinsame Deutung des IR-Bildmaterials stattgefunden hat, um die Lerngelegenheiten identisch zu halten.

Aus diesen Erfahrungen kann gefolgert werden, dass die Schülerinnen und Schüler sowohl beim Aufnehmen von aussagekräftigem IR-Bildmaterials als auch bei dessen Interpretation im Unterricht unterstützt werden müssen, damit eine Bedeutungszuweisung als Evidenz für Energieentwertung gelingt. Die im Rahmen von EmIR gemachten Erfahrungen können bei der Abstimmung des Lehrgangs auf den Einsatz der IR-Kamera herangezogen werden.

7.4 Zusammenfassung und Diskussion der Studie EmIR

Ziel der Studie EmIR war die Untersuchung des Einflusses der IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung innerhalb des didaktisch aufbereiteten Lernangebots *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*.

Mit dem Energielehrgang Teil 2 gelang sowohl in der Gruppe LmIR als auch in der Gruppe LoIR ein längerfristig signifikanter Zuwachs im Verständnis für Entwertung und Erhaltung mit großem Effekt. Die Ergebnisse der Vorstudien konnten durch die Studie EmIR reproduziert werden (H1 kann bestätigt werden). Ebenfalls findet in beiden Gruppen eine Anbahnung eines Verständnisses für Energieerhaltung statt. Diese Steigerung könnte auf eine generelle kognitive Reifung zurückgeführt werden, jedoch zeigt sich der Einfluss von Lehrgängen auf den Lernerfolg als bedeutsamer (Weßnigk & Neumann, 2015).

Der entwickelte Lehrgang steigert daher erwartungskonform das Verständnis für Entwertung und Erhaltung. Ob der Lehrgang aber zu einem vergleichbaren oder gesteigerten Verständnis gegenüber traditionellem Energieunterricht führt, kann mit der vorliegenden Studie nicht geklärt werden und wird in der Folgestudie EmIR+ untersucht.

Um innerhalb des Lehrgangs den Einfluss der IR-Kamera auf das Verständnis für Entwertung und Erhaltung zu untersuchen, wurden die Daten im Hinblick auf Gruppenunterschiede analysiert. Während die Ergebnisse des Energietests keine signifikanten Gruppenunterschiede zeigen, liegt bei der quantitativen Analyse der Interviewdaten für die Gruppe LmIR bezüglich der Energieentwertung ein signifikant höheres Verständnis mit großem Effekt im Vergleich zur Gruppe LoIR vor. Hypothese H2 kann eingeschränkt bestätigt werden.

Die qualitative Analyse der Interviewdaten zeigt, dass sich dieser Unterschied in der Gruppe LoIR einerseits in einer beobachtbaren Kontextabhängigkeit des Verständnisses für Energieentwertung manifestiert. Andererseits beschreiben die Teilnehmenden der Gruppe LmIR bei den periodischen Vorgängen die Folge der Entwertung für die konkrete Situation, indem sie die Abnahme der Amplitude mit Energieentwertung in Verbindung bringen. Dies konnte nur bei einzelnen Teilnehmenden der Gruppe LoIR beobachtet werden.

Dieser Gruppenunterschied in den Interviewdaten korrespondiert mit im Vorfeld getroffener Annahme, dass die IR-Kamera potentiell die Verständnisenwicklung im Rahmen von Energieentwertung zusätzlich unterstützen kann.

Da die quantitativen Daten größtenteils mittels MC-Items erhoben wurden, besteht die Möglichkeit, dass Gruppenunterschiede durch die Items des Tests nicht hinreichend abgebildet werden konnten. Zum einen gibt es bei den MC-Items nur die Abstufungen richtig oder falsch und zum anderen werden mittels MC-Aufgaben die genauen Gedankengänge zum Energieentwertungskonzept nicht ersichtlich. Demgegenüber ermöglicht insbesondere die qualitative Analyse der Interviewdaten komplementäre Informationen des vorliegenden Energieverständnisses, die über die im Test erreichte Tiefe hinausgehen (Plassmann & Schmitt, 2007). Dies wird beispielsweise durch das folgende Zitat eines Schülers aus der Gruppe LmIR erkennbar: *„Die [Energie] ist an die Umgebung abgegeben worden und ist jetzt nicht mehr einsetzbar für den Stein, aber ist halt noch da, nur dass sie für den Stein nicht mehr nützlich ist, weil sie nicht mehr sozusagen hier mit in diesem Prozess drin ist, aber noch in der Luft und deswegen. [...] dadurch wird ja auch die Luft erwärmt, also ist dann halt diese Energie in der Luft noch vorhanden, aber nicht mehr in dem Stein“.*

Es gilt jedoch zu bedenken, dass in der vorliegenden Studie nur von einem Drittel der Stichprobe qualitativen Daten erhoben wurden, was sich auf die Präzision der Ergebnisse auswirkt. Somit geben die Interviewdaten lediglich Hinweise auf ein höheres Verständnis in der Lehrgangsguppe mit IR-Kamera für den Aspekt Entwertung, was im Rahmen der Studie EmIR+ weiter untersucht wird.

Eine weitere Grenze der Studie ist die geringe Stichprobengröße von einer Klasse pro Gruppe. Bei der Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich auftretender Gruppenunterschiede sollte demnach berücksichtigt werden, dass diese durch klassenspezifische gruppenspezifische Prozesse und äußere Faktoren wie das Lernklima und die Lernbedingungen beeinflusst sein können. Zur Kontrolle dieser Einflussfaktoren wurden die Variablen *Interesse* und *abstraktes*

Denken erhoben, die keine Gruppenunterschiede zeigten. Zudem wurden zwei Parallelklassen einer Schule und somit eine vergleichbare Sozialstruktur ausgewählt. Auch die Rahmenbedingungen für den Unterricht in Bezug auf die Lage der Unterrichtsstunden (jeweils die erste Doppelstunde am Tag) sowie die Ferienzeiten unterschieden sich nicht.

Insgesamt gibt die Studie EmIR Hinweise darauf, dass die IR-Kamera im Lehrgang einen Beitrag zur Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung leisten kann. Dieser Unterschied zeigt sich jedoch nur in der Stichprobe der Interviews.

In der vorliegenden Studie wurde auf eine gezieltere mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera in den Lehr-Lernprozess verzichtet, um die Gleichheit der Inhalte und Lerngelegenheiten in beiden Gruppen zu kontrollieren und so gezielt den Einfluss der IR-Kamera untersuchen zu können. Somit fand zwar für beide Gruppen eine Einführung in die Funktionsweise der IR-Kamera als Messgerät zur Temperaturbestimmung statt, jedoch keine weitere Berücksichtigung bzw. Analyse des Video- und Bildmaterials oder Nutzung der IR-Kamera in zentralen Phasen. Die Analyse der Interviews ergab, dass keiner der Teilnehmenden der Gruppe LmIR die IR-Kamera zur Argumentation heranzog.

Aus mediendidaktischer Sicht ist bekannt, dass nicht von einer Lernwirksamkeit des Mediums selbst ausgegangen werden kann (Kerres, 2003). Hierfür ist eine Abstimmung der Technologie auf den Lehr-Lern-Prozess sowie eine fach- und mediendidaktische Aufbereitung notwendig (Mayer, 2014). In Bezug auf den Einsatz der IR-Kamera im entwickelten Lehrgang bedeutet dies, dass eine geeignete Einbettung in den Lehrgang stattfinden sollte. Um jedoch eine solche mediendidaktische Einbettung im entwickelten Lehrgang vornehmen zu können, ist zunächst eine Konkretisierung der erforderlichen Maßnahmen notwendig. Hierfür liefern die Ergebnisse und Erfahrungen der Studie EmIR wichtige Hinweise⁵⁰.

Die weiterführenden Fragestellungen, wie eine solche mediendidaktische Einbettung konkretisiert und umgesetzt werden kann, sowie darüber hinaus, welchen Einfluss eine weitere Einbettung auf das Verständnis für Entwertung und Erhaltung hat, werden in der folgenden Studie EmIR+ untersucht.

⁵⁰ Bisher konnte nur auf wenige Studien zurückgegriffen werden, die von einem Einsatz der IR-Kamera in Lehr-Lern-Prozessen in *informeller* Lernumgebung berichten (vgl. Kapitel 3.4.3).

8 Die Studie EmIR+: Energieentwertung mit der IR-Kamera + mediendidaktische Einbettung

Die Ergebnisse der Studie EmIR zeigen unabhängig vom Einsatz der IR-Kamera im entwickelten Lehrgang eine signifikante Steigerung im Verständnis für Energieentwertung und Energieerhaltung. Die Studie gibt demnach Hinweise darauf, dass der entwickelte Lehrgang das Verständnis für Entwertung und Erhaltung steigert. Die Frage, inwiefern der Lehrgang zu einer vergleichbaren oder gesteigerten Verständnisenwicklung gegenüber klassischen Zugängen führen kann, konnte mit der Studie EmIR jedoch nicht geklärt werden. Ziel der Studie EmIR+ ist damit die Untersuchung dieser weiterführenden Fragestellung (**Forschungsfrage 3**).

Im Rahmen von EmIR wurde die IR-Kamera lediglich als zusätzliches Messinstrument eingesetzt, um gezielt den Einfluss der IR-Kamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung untersuchen zu können. Aus fachdidaktischer Forschung ist jedoch bekannt, dass ein medial gestützter Lehr-Lern-Prozess eine spezielle Abstimmung auf das digitale Medium erfordert (vgl. Kapitel 3.5.1). Daher wird in einem nächsten Schritt die IR-Kamera in den entwickelten Lehrgang eingebettet, sodass diese selbst zum Lerngegenstand wird. Der weiterentwickelte Lehrgang umfasst unter anderem einen IR-Führerschein, der neben den Erkenntnissen fachdidaktischer Forschung bezüglich der Wahrnehmung und der Schülervorstellungen im Zusammenhang mit IR-Strahlung und Bildmaterial ebenfalls die Erfahrungen aus der Studie EmIR berücksichtigt (vgl. Kapitel 7.3.2.3). Im Zusammenhang mit EmIR+ erfolgt demnach ebenfalls die Untersuchung der Fragestellung, inwiefern diese mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera in den Lehr-Lernprozess das Verständnis für Energieentwertung und Energieerhaltung beeinflusst (**Forschungsfrage 4**)⁵¹.

⁵¹ Wie in Kapitel 4.1 erläutert, ist ein Vergleich der Untersuchungsgruppen LmIR und LmIR+ nicht Ziel der Studie EmIR+.

8.1 Design der Studie EmIR+

Ziel der Studie EmIR+ ist die Untersuchung

- der Lernförderlichkeit des **entwickelten Lehrgangs** *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* hinsichtlich des Verständnisses für die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung gegenüber traditionellem Energieunterricht und
- des Einflusses einer **mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera** in den entwickelten Lehrgang.

In diesem Zusammenhang sollen keine einzelnen Einflussfaktoren auf den Lernerfolg identifiziert werden, sondern eine Untersuchung der Lehrgänge als *Gesamtpakete* erfolgen (vgl. Kapitel 6.1). Die Studie EmIR+ weist somit Grundzüge einer summativen Evaluationsstudie auf, welche die Wirksamkeit von Interventionen unter Verwendung empirischer Forschungsmethoden untersucht (Bortz & Döring, 2006).

Zur Untersuchung der Forschungsfragen wird der in Kapitel 6.1 vorgestellte zweifaktorielle Versuchsplan verwendet, wobei hier die Faktorstufenkombinationen *traditioneller Energieunterricht (tE)*, *Lehrgang ohne IR-Kamera (LoIR)* sowie *Lehrgang mit IR-Kamera+ (LmIR+)* im Fokus der Betrachtung stehen. Mittels Einzelvergleichsverfahren können Kombinationen einzelner Treatments mit anderen Treatments verglichen werden (Bortz & Döring, 2006). Den Forschungshypothesen folgend, wird ein Einzelvergleich der Gruppe LoIR mit der Gruppe tE bzw. mit der Gruppe LmIR+ vorgenommen. Hierfür ist es jedoch nicht ausreichend, das Energieverständnis der Teilnehmenden nach dem jeweiligen Treatment zu erheben, da mithilfe dieser Vorgehensweise keine eindeutige Aussage über den Einfluss des jeweiligen Treatments auf das Energieverständnis getroffen werden kann. Dieses muss in Relation zum Vorwissen bewertet werden (vgl. Kapitel 7.1). Aus diesem Grund wurde hier ein Pretest-Whilettest-Posttest-Design gewählt (vgl. Abbildung 36).

Im Rahmen der Studie EmIR wurde der Pretest unmittelbar vor Einführung der Aspekte Energieentwertung und -erhaltung durchgeführt, da diese den Forschungsschwerpunkt bilden. Zudem wurde ein Follow-Up Test nach drei Monaten durchgeführt. Nach Wilhelm und Hopf (2014) sollte die Datenerhebung auf absolut notwendige Tests beschränkt werden. Aus diesem Grund wurde bei EmIR auf eine Erhebung zum Testzeitpunkt T0 verzichtet.

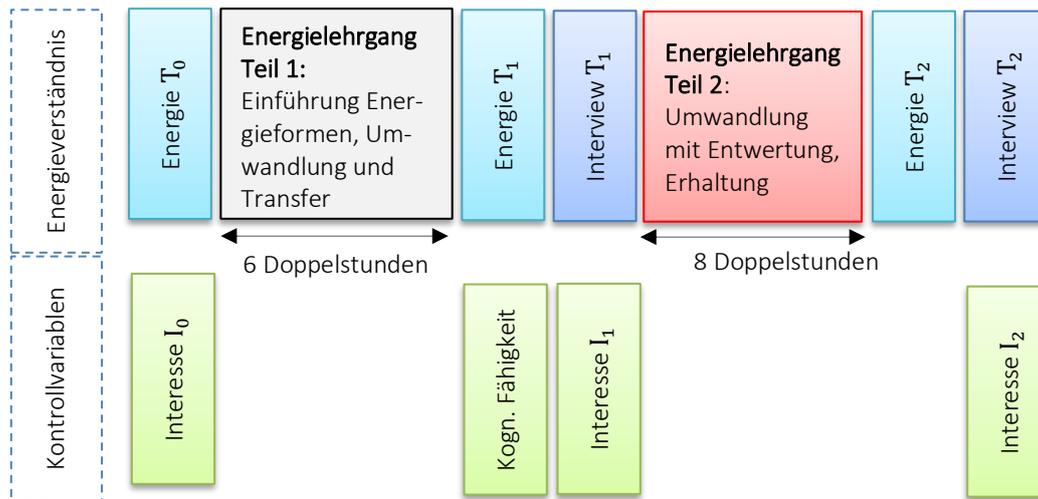


Abbildung 36: Ablaufplan und Datenerhebung von EmIR+ im Pretest-Whilettest-Posttest-Design.

Allerdings lässt sich in der Gruppe tE die Reihenfolge der Einführung der einzelnen Aspekte nicht kontrollieren, sodass die Inhalte und Ziele des Unterrichts zum Testzeitpunkt T1 stark variieren können. Somit wäre die Vergleichbarkeit der T1-Erhebung nicht gegeben. Aus diesem Grund wird in der Studie EmIR+ ebenfalls eine Erhebung vor Beginn des Energieunterrichts zum Zeitpunkt T0 durchgeführt, sodass trotzdem ein Vergleich des Vorwissens der Gruppen vorgenommen werden kann (vgl. Abbildung 36). Dieser wird im Folgenden als Pretest bezeichnet. In den Lehrganggruppen wurde zudem ein Energietest zum Zeitpunkt T1 durchgeführt, der eine bessere Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Studie EmIR gewährleisten soll (Whilettest).

Die Datenerhebung erfolgte vor dem Energielehrgang Teil 1 (T0), vor dem Energielehrgang Teil 2 (1) und direkt im Anschluss an den Lehrgang (T2) (vgl. Abbildung 36). Infolgedessen wurde ebenfalls der Erhebungszeitpunkt der Kontrollvariable *Interesse* angepasst.

Sowohl aus Gründen der Testökonomie als auch der problematisch zu bewertenden Vergleichbarkeit⁵² wurde im Anschluss auf einen Follow-Up-Test verzichtet.

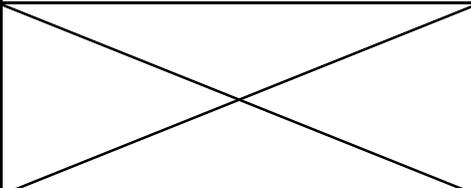
Bei der Datenerhebung wurden zwecks Vergleichbarkeit die bereits im Rahmen von EmIR verwendeten Testinstrumente herangezogen (vgl. Kapitel 6.2.2).

⁵² Im Rahmen von EmIR kann eine Vergleichbarkeit angenommen werden, da die Lerngruppen weiterhin von der Autorin unterrichtet wurden und so vergleichbare Lernziele und -inhalte des Unterrichts im Follow-Up Zeitraum werden gewährleistet werden konnten. Diese Kontrolle ist bei EmIR+ aufgrund des Designs nicht möglich.

8.2 Durchführung und Stichprobenbeschreibung

Zur Untersuchung der Forschungsfragen 3 und 4 (vgl. Kapitel 4.1) erfolgte eine erneute Datenerhebung in insgesamt acht 7. Klassen ($N = 207$) an nds. Gymnasien, die von sechs verschiedenen Lehrpersonen an zwei Schulen unterrichtet wurden. Hierbei handelt es sich um einen balancierten Versuchsplan, d. h. jede untersuchte Kombination umfasst drei unterschiedliche Klassen (Hussy et al., 2013). Die angegebenen Stichprobengrößen schließen nur Personen ein, die an allen Erhebungen teilgenommen haben (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Ausschnitt aus der Kreuztabelle zum Studiendesign (vgl. Kapitel Tabelle 2).

	Lehrgang	traditioneller Energieunterricht
ohne IR-Kamera ⁵³	$N = 72$ $(m = 40; w = 32)$ Interview: $N = 8$	$N = 75$ $(m = 35; w = 40)$ Interview: $N = 9$
mit IR-Kamera+	$N = 81$ $(m = 33; w = 48)$ Interview: $N = 9$	

Hierbei schließt die Untersuchungsgruppe „Lehrgang ohne IR-Kamera“ die in EmIR untersuchte Klasse ($N = 23$) mit ein.

Im Folgenden wird die Gruppe tE auch als Kontrollgruppe bezeichnet, weil der Vergleich zwischen den Gruppen LoIR sowie tE nicht nur „der Feststellung des Effekts auf [das Energieverständnis], sondern auch der Kontrolle von Störvariablen dient“ (Hussy et al., 2013, S. 133).

Der Erhebungszeitraum erstreckte sich von August 2017 bis Januar 2019. In dieser Zeit unterrichteten insgesamt drei Lehrpersonen ihren eigenen, traditionellen Energielehrgang. Dabei handelte es sich um zwei Kollegen der Autorin, die zur selben Zeit in Parallelklassen des 7. Jahrgangs in Physik unterrichteten und um eine Lehrperson einer Stadtteilschule aus Hannover mit vergleichbarer Sozialstruktur, die mit der Leibniz Universität Hannover kooperiert. Die Lehrpersonen wurden am Ende des Energieunterrichts hinsichtlich der Zielkonvergenz,

⁵³ Hier sind bei der Gruppe LoIR bereits die Daten aus EmIR inkludiert.

Schlüsselexperimenten⁵⁴ sowie zum Zeitumfang befragt. Ebenfalls werden die Klassenbucheinträge als Vergleichsgrundlage herangezogen.

In den Untersuchungsgruppen LoIR und LmIR+ unterrichteten neben der Autorin zwei weitere Lehrpersonen. Diese entschlossen sich selbstständig zur Teilnahme und führten die Lehrgänge in den Parallelklassen durch. Obwohl eine zufällige Zuordnung der Lehrpersonen zu den Untersuchungsgruppen aus Gründen der internen Validität vorzuziehen wäre, konnten die Lehrpersonen selbst wählen, in welcher Untersuchungsgruppe sie unterrichten möchten, um ihre Bereitschaft an der Teilnahme sicherzustellen. Im Rahmen der Schulung der Lehrpersonen durch die Autorin wurden diese jeweils über die Grundideen des didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* informiert und erhielten eine Einführung in das adaptierte Energiekontomodell sowie das zugehörige Material. Dabei handelte es sich zum einen um Stundenverlaufspläne, die zusätzlich Informationen zur Zielsetzung der Stunde, zentrale Impulse sowie erwartete Schwierigkeiten und Schülervorstellungen umfassten. Zum anderen erhielten die Lehrpersonen die zugehörigen Arbeitsblätter und konnten bereitgestellte Experimentalaufbauten nutzen. Da die Stunden wöchentlich parallel unterrichtet wurden, fand in jeder Woche unter den Lehrpersonen ein informeller Austausch statt, in dem offene Fragen diskutiert werden konnten. Die Lehrperson, die in der Gruppe LmIR+ unterrichtete, wurde darüber hinaus in die Funktionsweise der IR-Kamera eingeführt und über mögliche Schwierigkeiten beim Experimentieren sowie Schülervorstellungen informiert.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Daten der Studie EmIR wurde auch hier die 14. Doppelstunde des Lehrgangs nicht in Gänze durchgeführt (vgl. Kapitel 7.2).

8.3 Maßnahmen zur mediendidaktischen Einbettung der Infrarotkamera

Aus der Mediendidaktik ist bekannt, dass digitale Medien wie IR-Kameras kein Wissen transportieren, sondern ein Lernangebot darstellen, welches einer didaktischen Aufbereitung bedarf, um die gewünschten Lernprozesse anzuregen (Kerres, 2013).

Mittels IR-Kamera wird den Lernenden ein falschfarbenes Bild einer Realsituation zur Verfügung gestellt. Ziel des Einsatzes ist die Bedeutungszuweisung des Bildmaterials als Evidenz für Energieentwertungsprozesse. Die Untersuchungsergebnisse von Haglund und Hedberg et al. (2015) sowie Hoppe (2018) weisen jedoch darauf hin, dass das bloße Bereitstellen der Bilder

⁵⁴ Hiermit sind Experimente gemeint, die eine zentrale Rolle im Lehrgang einnehmen, da sie beispielsweise der Einführung der Aspekte Entwertung und -erhaltung dienen.

die beabsichtigten Lernprozesse nicht induziert und keine Bedeutungszuweisung als Evidenz für Wärmeleitung bzw. Energieentwertung stattfindet. Auch die Ergebnisse der qualitativen Analyse der Interviewtranskripte der Studie EmIR (vgl. Kapitel 7.3.2.2) sprechen für eine fehlende Bedeutungszuweisung als Evidenz für Energieentwertung, da von keinem der Teilnehmenden die IR-Kamera zur Argumentation herangezogen wird. Demnach muss der Lerngegenstand „IR-Bildmaterial“ so aufbereitet werden, dass dieser ein Lernangebot darstellt. Hierfür müssen sowohl bekannte Schülervorstellung zur IR-Kamera bzw. IR-Bildmaterial (vgl. Kapitel 3.4) als auch die Schwierigkeiten bei der Aufnahme von aussagekräftigem IR-Bildmaterial und dessen Interpretation berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 7.3.2.3).

Insgesamt lassen sich in der Literatur nur wenige konkrete Empfehlungen für Maßnahmen der mediendidaktischen Einbettung von IR-Kameras finden. Aus diesem Grund wurden im Vorfeld der Planung Expertenmeinungen eingeholt. Dabei handelt es sich zum einen um Empfehlungen von M. Kerres, der im Bereich der Mediendidaktik tätig ist und um J. Haglund, der Teil eines Forscherteams ist, die bereits Studien zum Einsatz der IR-Kamera durchgeführten (vgl. Kapitel 3.4.3). Nach M. Kerres und J. Haglund muss bei einer mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera berücksichtigt werden, dass

- diese zu einer Intensivierung der Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand IR-Kamera bzw. IR-Bildmaterial führt (M. Kerres, persönl. Mitteilung, 27.09.2017).
- die Lernenden genügend Zeit haben, sich im Voraus mit der Technologie auseinanderzusetzen und diese zu erforschen (J. Haglund, persönl. Mitteilung, 27.09.2017).
- für die Altersgruppe angemessene und relevante Phänomene wie Reibung oder Kollision betrachtet werden (J. Haglund, persönl. Mitteilung, 27.09.2017)
- bereits vor der Thematisierung von Entwertungsprozessen im Lehrgang eine Verknüpfung von IR-Bildmaterial mit innerer Energie und Energietransfer hergestellt wird (Notwendigkeit der Konzeptentwicklung J. Haglund, persönl. Mitteilung, 27.09.2017)

Zusätzlich können aus den im Rahmen von EmIR gemachten Erfahrungen und beobachteten Schwierigkeiten beim Experimentieren mit der IR-Kamera folgende Schlüsse gezogen werden: Die Phänomene lagen außerhalb des Beobachtungsbereichs des IR-Bildes, der Bildausschnitt wurde unpassend gewählt oder temperaturerhöhte Objekte wie Hände nicht aus dem Bildbereich entfernt. Somit konnte das entstandene Bildmaterial nicht als Evidenz für Energieentwertung dienen oder Lernende gar von diesem Konzept „überzeugen“. Als Handlungs-

konsequenzen für eine mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera ergibt sich hieraus die Notwendigkeit

- Lernenden „überzeugendes“ IR-Bildmaterial in Form von IR-Bildern und Videos der Lehrgangsexperimente zur Verfügung zu stellen, das die Temperaturerhöhung deutlich zeigt.
- Lernende beim Anfertigen des eigenen IR-Bildmaterials stärker zu unterstützen, um diese im Hinblick auf die Aufnahme von aussagekräftigem IR-Bildmaterials handlungsfähig zu machen.

Durch die curricularen Vorgaben sollen sich aus den Maßnahmen zur Einbettung jedoch keine Auswirkungen auf den zeitlichen Umfang des konzipierten Lehrgangs ergeben. Ebenfalls sollen aus Gründen der Vergleichbarkeit das didaktische Konzept sowie die thematisierten Inhalte unverändert bleiben.

Die im Rahmen der Lehrgangsstunden vorgenommenen Anpassungen werden im Anhang ausführlich beschrieben (vgl. Anhang B, S. 259ff). Beispielsweise wurde in der neunten Doppelstunde eine Anpassung eines Experiments vorgenommen, bei dem zwei Klötze mit verschiedenen Oberflächen eine schiefe Ebene hinabrutschen. Statt die Lernenden von dieser Situation eigenständig ein IR-Video aufnehmen zu lassen, wird ihnen im angepassten Lehrgang ein IR-Video dieses Vorgangs zur Verfügung gestellt, welches sie zunächst beschreiben und in einem zweiten Schritt hinsichtlich der Energieumwandlung deuten sollen. Ebenfalls soll eine Zuordnung der Oberflächen zu den Klötzen innerhalb des IR-Videos vorgenommen werden.

Eine weitere aus diesen Überlegungen abgeleitete Maßnahme zur mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera ist die Durchführung eines IR-Kameraführerscheins, der im Folgenden näher erläutert wird.

8.3.1 Der IR-Kameraführerschein

Als Maßnahme der mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera wurde im Rahmen dieser Arbeit ein IR-Kameraführerschein entwickelt, der die unterschiedlichen Herausforderungen bei der Aufnahme sowie Interpretation von IR-Bildmaterial adressiert und Schülerinnen und Schüler beim eigenständigen Experimentieren mit der IR-Kamera unterstützen soll.

Im Vordergrund steht dabei die Interpretation der IR-Videos hinsichtlich der Temperaturänderung im Beobachtungsbereich sowie die Ursache von Änderungen in der farblichen Skalierung der Bilder. Diese Phänomene sind Ausgangspunkt für das Aufstellen von Regeln beim Experimentieren mit der IR-Kamera.

8.3.1.1 Konzeption des IR-Kamera-Führerscheins

Der Führerschein umfasst insgesamt drei Szenarien, bei denen ein Ball oder eine Kugel im Zentrum der Beobachtung steht. In diesem Zusammenhang sollen die Schülerinnen und Schüler bei jedem Szenario

- die im IR-Video dargestellte Handlung beschreiben
- gezielt die Änderung der Farbskalierung der Kugel erklären. Dabei ist sowohl der Zeitpunkt der Änderung als auch die jeweilige Farbe zu berücksichtigen.
- Rückschlüsse auf eine mögliche Änderung der Temperatur der Kugel ziehen und ggf. Gründe für diese Temperaturänderung angeben.

Weiterhin können die Schülerinnen und Schüler unter der Aufgabenstellung „Während des Videos habe ich mich gefragt...“ eigene Gedanken bei der Betrachtung des IR-Videos festhalten.

Das erste Szenario zeigt ein IR-Video einer ruhenden Kugel, die auf einem Tisch liegt (vgl. Abbildung 37). Während des Videos wird eine Hand in den Bildbereich geführt und im Anschluss aus diesem entfernt. Im IR-Video ist die ruhende Kugel zunächst rot skaliert, während die Umgebung grün dargestellt wird. Wird die Hand ins Bild geführt, ändert sich die Farbskalierung im Bildbereich: Der

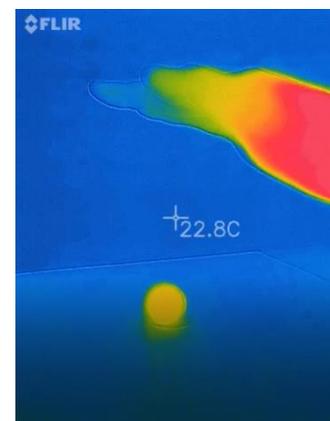


Abbildung 37: Aufgabe 1 des IR-Kameraführerscheins.

Hand wird die Farbe Rot zugeordnet, während sich die Farben von Kugel und Umgebung zu gelb bzw. blau ändern. Wird die Hand aus dem Bildbereich entfernt, nehmen Kugel und Umgebung wieder die ursprüngliche Farbskalierung an.

Ziel dieses Videos ist es, die dynamische Farbanpassung bewusst zu machen, die der höchsten Temperatur im Beobachtungsbereich die Farbe Rot und der niedrigsten Dunkelblau zuordnet. Obwohl die Kugel ihre Farbskalierung ändert, bleibt die Temperatur über den Beobachtungszeitraum gleich. Durch diese dynamische Anpassung der Farbskala kommt es häufig zu Fehlinterpretationen hinsichtlich einer Temperaturänderung der Objekte im Beobachtungsbereich (Hoppe, 2018; Meiringer, 2013). Mithilfe dieses Szenarios soll die dynamische Anpassung herausgestellt werden, die bei der Interpretation der Bilder berücksichtigt werden muss.

Das zweite Szenario zeigt ein IR-Video eines Gummiballs, der vom Tisch aufgehoben und einige Sekunden in der Hand gehalten wird. Der Ball wird im Anschluss zurück auf den Tisch gelegt und die Hand aus dem Bildbereich entfernt. Auf dem IR-Video ist der Ball vor dem Kontakt mit der Hand grün skaliert, ebenso wie die Umgebung. Nach dem Handkontakt wird die Berührungsfläche rot skaliert und die Umgebung blau (vgl. Abbildung 38). Es hat eine Temperaturerhöhung des Balls stattgefunden, woraus auf einen Energietransfer von der Hand zum Ball geschlossen werden kann.

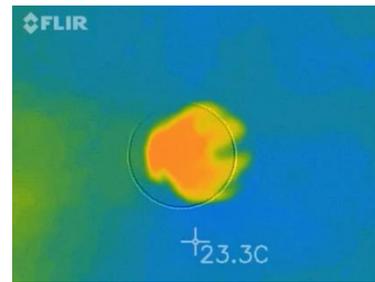


Abbildung 38: Aufgabe 2 des IR-Kameraführerscheins.

Ziel des Einsatzes der IR-Kamera ist die Visualisierung von Temperaturerhöhungen in Folge Reibungsprozessen. Durch den Kontakt der Objekte mit den Händen kann jedoch bereits vor Durchführung des Experiments eine Temperaturerhöhung hervorgerufen werden. Dies hat zur Folge, dass die eigentliche Beobachtung der Temperaturerhöhung durch Reibung beim Experimentieren mithilfe der IR-Kamera nicht beobachtet werden kann bzw. Missinterpretationen des IR-Bildes begünstigt werden.

Das letzte Szenario zeigt eine kleine Holzkugel, die zusammen mit weiteren Objekten unterschiedlicher Temperatur angeordnet ist. Der Anfang des Videos zeigt die Kugel in Nahaufnahme, wobei der Abstand der Kamera zur Kugel nach und nach vergrößert wird. Durch dieses Herauszoomen wird der Bildbereich vergrößert, sodass immer mehr Objekte sichtbar werden. Im IR-Video ist die kleine Kugel in Nahaufnahme zunächst farblich rot skaliert. Durch den immer größer werdenden Bildausschnitt ändert sich die Farbskalierung der Kugel sowie der Objekte im Beobachtungsbereich in Abhängigkeit vom Zoom. Beispielsweise ist die Kugel gelb skaliert, wenn sich die umliegenden Objekte im Beobachtungsbereich befinden (vgl. Abbildung 39).



Abbildung 39: Aufgabe 3 des IR-Kameraführerscheins.

Ändert sich die Farbskalierung der Kugel sowie der Objekte im Beobachtungsbereich in Abhängigkeit vom Zoom. Beispielsweise ist die Kugel gelb skaliert, wenn sich die umliegenden Objekte im Beobachtungsbereich befinden (vgl. Abbildung 39).

Auch hier steht die Anpassung der Farbskala im Vordergrund, jedoch unter einer anderen Perspektive: Bei der Beobachtung von Vorgängen unter dem Aspekt der Energieentwertung sind eher geringe Temperaturerhöhungen zu erwarten. Befinden sich im Beobachtungsbereich viele Objekte, die gegenüber der Umgebungstemperatur eine höhere Temperatur aufweisen, können die in Folge von Reibungsprozessen hervorgerufenen Temperaturänderung nicht mehr so leicht identifiziert werden. Dabei kann es sich zum einen um Heizkörper handeln, aber

auch um die Lernenden selbst. Häufig sind auch der Arbeitsbereich bzw. Stühle in Folge von Körperkontakt temperaturerhöht.

Dabei nehmen die gewählten Szenarien nicht nur eine Zeigefunktion ein, sondern sollen ebenfalls Ausgangspunkt für Schlussfolgerungen für das Experimentieren mit der IR-Kamera sein. Aus den gewählten Szenarien lassen sich allgemeine Regeln für ein erfolgreiches Experimentieren mit der IR-Kamera ableiten:

- Beim Experimentieren mit der IR-Kamera sollten die Objekte im Vorfeld nicht berührt werden, um eine Wärmeübertragung zu vermeiden und die geringen Temperaturerhöhungen im Zusammenhang mit Reibungsprozessen visualisieren zu können.
- Es muss ein Beobachtungsbereich gewählt werden, in dessen Zentrum über den gesamten Beobachtungszeitraum der Vorgang steht.
- Durch Gliedmaßen wie Hände und Füße oder auch „Fußspuren“ im Bildbereich kann die Beobachtung erschwert werden. Daher sollten im Vorfeld alle temperaturerhöhten Objekte im Beobachtungsbereich vermieden werden.

Eine Berücksichtigung dieser Regeln beim Experimentieren soll die Schülerinnen und Schüler darin unterstützen, aussagekräftige IR-Bilder bzw. IR-Videos aufzunehmen und sie für die Interpretation dieser Effekte sensibilisieren.

8.3.1.2 Studie zur Untersuchung der Wirksamkeit des IR-Kameraführerscheins

Ziel des Einsatzes des IR-Kameraführerscheins ist es die Schülerinnen und Schüler beim eigenständigen Experimentieren mit der IR-Kamera sowie bei der Interpretation von IR-Bildmaterial zu unterstützen.

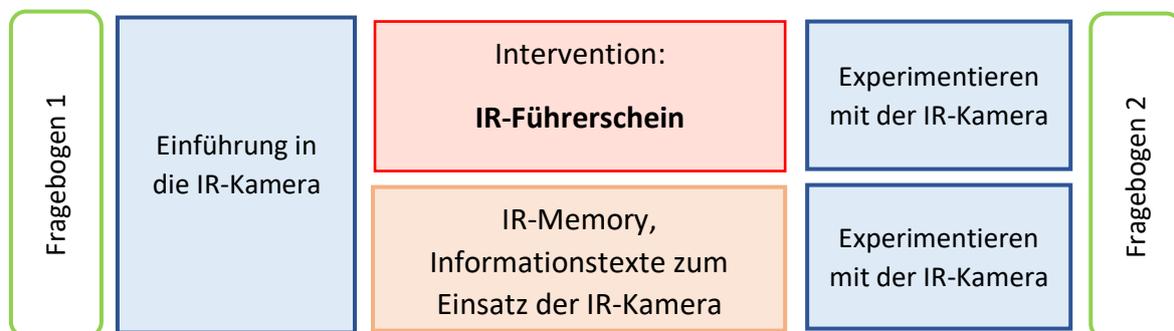


Abbildung 40: Versuchsplan zur Untersuchung der Wirksamkeit des IR-Führerscheins.

Inwiefern diese Zielsetzung durch das Absolvieren des IR-Kameraführerscheins erreicht werden kann, wurde im Rahmen einer Studie⁵⁵ im Kontrollgruppendesign (N = 28) untersucht. Das gewählte Untersuchungsdesign ist in Abbildung 40 dargestellt.

Für die Untersuchung der Lernwirksamkeit des IR-Führerscheins erhielten die Teilnehmenden unabhängig ihrer Gruppenzugehörigkeit zunächst eine kurze Einführung in die IR-Kamera und setzten sich mit der Funktionsweise sowie dem IR-Bildmaterial auseinander. Erst nach dieser gemeinsamen Phase wurde eine randomisierte Aufteilung der Gruppe in Kontroll- und Inter-



Abbildung 41: Beispiel eines Bildpaars aus dem IR-Memory von Köhn (2019).

ventionsgruppe vorgenommen. Um eine Vergleichbarkeit der Lerngelegenheiten zu schaffen, wurde beiden Gruppen die Gelegenheit der aktiven Auseinandersetzung mit IR-Bildmaterial gegeben. Während die Interventionsgruppe den IR-Kameraführerschein absolvierte, erhielt die Kontrollgruppe Infor-

mationstexte über die Einsatzmöglichkeiten von IR-Kameras und führte ein IR-Memory durch. Ziel dieses Memorys ist das Finden von Bildpaaren: Jedem Realbild wird ein zugehöriges IR-Bild zugeordnet (vgl. Abbildung 41). Diese Zuordnung erforderte neben einem Vergleich der Bildelemente zusätzlich Überlegungen zum Temperaturprofil im Bildbereich. Darüber hinaus zeigen die Bilder Alltagssituationen, sodass die Lernenden eine Verknüpfung mit ihrer Erfahrungsbasis bzw. Vorwissen herstellen können (vgl. Kapitel 3.3).

Im Anschluss folgte eine Experimentierphase, in der beide Gruppen jeweils von einem Wagen, der eine Rampe herunterrutscht, ein IR-Video aufnahmen.

Die Datenerhebung erfolgte im Rahmen einer Bachelorarbeit im Pretest-Posttest-Design mittels Fragebögen, mit denen neben Vorkenntnissen zur IR-Kamera ebenfalls das Interesse an der Arbeit mit der Kamera sowie Schwierigkeiten beim Experimentieren erhoben wurden (Köhn, 2019). Weiterhin enthielt der Fragebogen offene Items zur Interpretation eines vorgegebenen IR-Bildes.

Eine weitere wichtige Datenquelle stellten die von den Teilnehmenden selbst aufgenommenen IR-Videos dar, die anhand von theoriegeleiteten Gütekriterien bewertet wurden (Köhn, 2019). Dabei handelte es sich zum einen um Gestaltungsprinzipien wie den Abstand zum Experiment, die Perspektive und den Bildfokus, zum andern um inhaltliche Kriterien wie die

⁵⁵ Die Studie wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit von Köhn (2019) unter Anleitung und Betreuung der Autorin durchgeführt.

deutliche Beobachtbarkeit des gewünschten Phänomens. Hierzu zählt auch das Erfassen von Störquellen, die die Farbskalierung beeinflussen (ebd.).

Die Datenanalyse zeigte, dass die IR-Videos der Interventionsgruppe eine deutlich höhere Güte aufwiesen als die der Kontrollgruppe. Während bei der Kontrollgruppe das zu beobachtende Phänomen der Temperaturerhöhung von Wagen und Rampe in den Aufnahmen überwiegend nicht erkennbar war, gelang dies in allen IR-Videos der Interventionsgruppe. Auffällig sind ebenso Unterschiede in der Quantität: Die Kontrollgruppe nahm durchschnittlich zehnmal mehr Videos auf als die Interventionsgruppe. Ebenso wiesen die IR-Videos der Kontrollgruppe wenig Variationsreichtum hinsichtlich der Perspektive auf das Experiment auf; die Teilnehmenden wählten jeweils einen relativ großen Abstand zum Versuchsaufbau, sodass das Phänomen häufig durch Mitschüler oder andere temperaturerhöhte Objekte in Folge der automatischen Farbanpassung nicht mehr eindeutig erkennbar war (Köhn, 2019). Dies spiegelte sich ebenfalls in der Auswertung der Fragebögen wider; die Mehrheit der Teilnehmenden aus der Kontrollgruppe gab an, dass sie Schwierigkeiten bei der Aufnahme der Videos hatten, da sie keine Auffälligkeiten filmen konnten. Die Güte ihrer Aufnahmen bewerteten diese selbst als neutral bis schlecht. Demgegenüber schätzten die Teilnehmenden der Interventionsgruppe die Güte ihrer Videos überwiegend als gut bis sehr gut ein.

Eine korrekte Interpretation des vorgegebenen IR-Bildes gelang in beiden Gruppen, wobei jedoch Unterschiede in der Qualität der Beschreibung festgestellt werden konnten. Beispielsweise nimmt die Interventionsgruppe explizit Bezug auf die Temperatur, was in der Kontrollgruppe nur implizit erfolgte.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Studie, dass sich der IR-Kameraführerschein sowohl positiv auf die Güte der aufgenommenen IR-Videos als auch auf die Interpretation von IR-Bildmaterial auswirkt.

8.4 Ergebnisse der Studie EmIR+

Bei der Auswertung der Ergebnisse werden die Daten der Gruppe LoIR aus der Studie EmIR miteinbezogen. Tabelle 17 gibt einen Überblick über alle vorliegenden Datensätze.

Tabelle 17: Überblick über die Zeitpunkte der Datenerhebung aller Untersuchungsgruppen. Die rot gefärbten Felder markieren die Zeitpunkte, zu denen keine Daten erhoben wurden.

Untersuchungsgruppe	Anzahl Klassen	Studie	Test	T0	T1	T2	T3
Lehrgang mit IR-Kamera	1	EmIR	Energietest		✓	✓	✓
			Interview		✓	✓	
			Interesse		✓		✓
			KFT		✓		
Lehrgang ohne IR-Kamera	1	EmIR	Energietest		✓	✓	✓
			Interview		✓	✓	
			Interesse		✓		✓
			KFT		✓		
Lehrgang ohne IR-Kamera	2	EmIR+	Energietest	✓	✓	✓	
			Interview		✓	✓	
			Interesse	✓		✓	
			KFT			✓	
Traditioneller Energieunterricht	3	EmIR+	Energietest	✓		✓	
			Interview		✓	✓	
			Interesse	✓		✓	
			KFT			✓	
Lehrgang mit IR-Kamera+	3	EmIR+	Energietest	✓	✓	✓	
			Interview			✓	
			Interesse	✓		✓	
			KFT			✓	

Wie bereits im Kapitel 8.2 erläutert, liegen für eine Klasse der Untersuchungsgruppe „Lehrgang ohne IR-Kamera“ zum Testzeitpunkt T0 keine Daten vor. Dies muss bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden. Jedoch ergibt die Auswertung der Ergebnisse des Energietests⁵⁶ auf Klassenebene über alle Klassen hinweg zu diesem Zeitpunkt keine signifikanten

⁵⁶ Dabei werden alle untersuchten Aspekte berücksichtigt.

Unterschiede. Zudem sind auch beim Vergleich der Ergebnisse der Klassen (inklusive der Klassen aus EmIR), die an der Erhebung zum Zeitpunkt T1 teilgenommen haben, keine signifikanten Klassenunterschiede im Verständnis festzustellen. Dies spricht dafür, dass in der Klasse, in der zum Zeitpunkt T0 keine Erhebung stattgefunden hat, ein mit den anderen Gruppen vergleichbares Vorwissen vorliegt. Daher werden im Folgenden die Energietestdaten dieser Klasse zu den Testzeitpunkten T1 und T2 bei der Analyse berücksichtigt (die in der Analyse verwendeten Datensätze sind in Tabelle 17 rot umrandet). Bei der Auswertung des Interesses kann diese Klasse jedoch nicht einbezogen werden. Aufgrund der hohen Retest-Reliabilität des N-Teils des KFT ($r = .71$) ist eine Stabilität dieser Werte über den gesamten Testzeitraum anzunehmen (Heller & Perleth, 2000). Daher werden alle Klassen bei der Analyse berücksichtigt.

In jeweils einer Klasse aus den vier Untersuchungsgruppen wurden zusätzlich zum Energietest Interviews durchgeführt, wobei bei der Gruppe EmIR+ zum Zeitpunkt T1 kein Interview durchgeführt werden konnte. Die Klasse war zum Zeitpunkt T1 aus organisatorischen Gründen für Interviews nicht erreichbar. Ein Nacherheben war nicht möglich, da die Klasse danach bereits in die Aspekte Entwertung und Erhaltung eingeführt wurde und so die Vergleichbarkeit mit den anderen Lehrganggruppen nicht mehr gegeben gewesen wäre. Die Aussagekraft der Interviewdaten ist für diese Gruppe dadurch eingeschränkt. Für eine Vergleichbarkeit spricht jedoch, dass der Mehrgruppenvergleich der quantitativen Analyse der Interviewdaten zum Zeitpunkt T1 keine signifikanten Gruppenunterschiede zwischen den Untersuchungsgruppen tE, LoIR und LmIR zeigt. Darüber hinaus ergibt die Analyse der Ergebnisse des Energietests der Gruppen LoIR, LmIR und LmIR+ zum Zeitpunkt T1 weder auf Klassenebene noch auf Gruppenebene einen signifikanten Gruppenunterschied. Diese Ergebnisse sprechen für eine Vergleichbarkeit des Vorwissens zum Zeitpunkt T1.

8.4.1 Reliabilitätsanalyse und Trennschärfe der Messinstrumente

Energietest

Zur Bestimmung der internen Konsistenz des Energietests wurde in Anlehnung an Michel (2018) auf Grundlage der Posttest-Daten⁵⁷ der Untersuchungsgruppen Cronbachs Alpha bestimmt. Tabelle 18 zeigt die ermittelten Werte für den gesamten Test sowie für die Skalen zur Energieentwertung und -erhaltung.

Tabelle 18: Cronbachs Alpha des gesamten Testinstruments sowie der Subskalen Entwertung und Erhaltung.

	Energietest gesamt 29 Items	Skala Entwertung 11 Items	Skala Erhaltung 7 Items
Lehrgang ohne IR-Kamera	$\alpha = .75$	$\alpha = .60$	$\alpha = .60$
Lehrgang mit IR-Kamera+	$\alpha = .80$	$\alpha = .66$	$\alpha = .52$
Traditioneller Energie- unterricht	$\alpha = .71$	$\alpha = .62$	$\alpha = .38$

Die interne Konsistenz des gesamten Testinstruments liegt mit Cronbachs $\alpha > .7$ in einem akzeptablen bis guten Bereich und ist vergleichbar mit der von Michel (2018) ermittelten Reliabilität von $\alpha = .78$. Allerdings ergeben sich für die Subskalen Entwertung und Erhaltung Werte von $\alpha < .7$, die als fragwürdig bis schlecht eingestuft werden müssen. Ebenfalls wurde auf Basis der Posttest-Daten der Lehrgangsguppen⁵⁸ für die Items der Subskalen *Energieentwertung* und *Energieerhaltung* die jeweilige Trennschärfe ermittelt, die ein Maß für die Korrelation eines Items mit den anderen Items der Skala angibt. Die Trennschärfe kann demnach zur Beurteilung der Güte herangezogen werden, inwiefern das Ergebnis eines Items das Ergebnis der gesamten Skala vorhersagt.

Trennschärfekoeffizienten ab 0.3 werden in der Literatur als ausreichend bewertet (vgl. bspw. Bortz & Döring, 2006), sodass die in Tabelle 19 rot markierten Items als problematisch zu beurteilen sind.

Eine Verbesserung der internen Konsistenz der Subskalen würde durch eine Anpassung der Skalen erreicht, indem die betreffenden Items weggelassen werden. Allerdings wurde in der vorliegenden Arbeit ein etablierter Fragebogen zur Erhebung des Energieverständnisses verwendet, der bereits einen Testkonstruktionszyklus durchlaufen hat. Darüber hinaus sollten

⁵⁷ Da vor der Pretesterhebung im Fach Physik noch kein Energieunterricht stattgefunden hat und daher von einer eher geringen Lösungswahrscheinlichkeit zu diesem Zeitpunkt ausgegangen werden kann, wurden hier die Posttestdaten zur Analyse herangezogen. Darüber hinaus kann so ein Vergleich mit den Werten von Michel (2018) erfolgen, dessen Analyse sich ebenfalls auf die Posttestdaten stützt.

⁵⁸ Betrachtet wurden alle Gruppen, die unabhängig vom Einsatz der IR-Kamera im entwickelten Lehrgang *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* unterrichtet wurden.

eine Fragebogenanpassung und die Erhebung nicht an einer Stichprobe vorgenommen werden. Aus diesen Gründen wird hier keine Anpassung des Testinstruments vorgenommen.

Gründe für die Ergebnisse der Trennschärfenanalyse können sein, dass der Test so konstruiert wurde, dass die Subskalen aus Expertensicht alle das gleiche Konstrukt testen, dieses jedoch in unterschiedlichen Kontexten abfragt. Aus fachdidaktischer Forschung ist bekannt, dass Schülervorstellungen eine hohe Kontextabhängigkeit aufweisen (vgl. bspw. Hardy et al., 2010), d. h. ein aus physikalischer Sicht identischer Vorgang, der in unterschiedliche Kontexte eingebettet ist, kann bei den Schülerinnen und Schülern unterschiedliche Vorstellungen aktivieren und zu divergenten bis hin zu widersprüchlichen Erklärungen führen, die das Antwortverhalten innerhalb einer Subskala beeinflussen können. Bei den Items mit geringerer Trennschärfe könnte daher ein stärkerer Einfluss des Kontextes vermutet werden.

Tabelle 19: Trennschärfe der Items in den Skalen Entwertung und Erhaltung.

Item Entwertung	Trennschärfe	Item Erhaltung	Trennschärfe
Gokar_T2_r	.19	EEBew_T2_r	.15
EEPen_T2_r	.41	AchGw_T2_r	.43
EESwu_T2_r	.39	EHBus_T2_r	.24
EEHSL_T2_r	.36	EHAchtT2_pc_r	.32
EEThe_T2_r	.30	EHFlu1T2_pc_r	.22
EERot_T2_r	.16	KuGew_T2_r_1	.42
EUSolaT2_r	.14	EHAutoT2_r	.18
EEHan_T2_r	.22		
ReibS_T2_pc_r	.34		
Half_T2_pc_r	.51		
EEFlu2T2_pc_r	.45		

Im Rahmen der Kodierung der offenen Items wurden 20% der Daten auf Grundlage des Kodiermanuals von zwei verschiedenen Kodierern bewertet und als Maß der Übereinstimmung die Interrater-Reliabilität Cohens Kappa κ bestimmt (vgl. Tabelle 20). Bortz und Döring (2006) sprechen von einer guten Übereinstimmung, wenn $.60 \leq \kappa \leq .75$; Wirtz und Kutschmann (2007) nennen zur Beurteilung der Güte den Bereich $.60 \leq \kappa \leq .74$ als gute Übereinstimmung und für $\kappa \geq .75$ eine sehr gute Übereinstimmung. Demnach liegt zu allen Testzeitpunkten eine sehr gute Übereinstimmung vor.

Tabelle 20: Interrater-Reliabilität Cohens Kappa für die Testzeitpunkte T0, T1 und T2.

T0	T1	T2
$\kappa = .905, p = .000$	$\kappa = .899, p = .000$	$\kappa = .788, p = .000$

Interessentest

Zur Erhebung des fachspezifischen Interesses wurde die von Köller et al. (2000) entwickelte 4-stufige Skala für das Fach Physik adaptiert (vgl. Kapitel 6.2.3). Köller et al. (2000) geben für die interne Konsistenz ihrer Skala einen Wert von $\alpha = .88$ an.

Auf Basis der Posttest-Daten der Lehrgangsguppen wurde in der Stichprobe der vorliegenden Arbeit $\alpha = .72$ ermittelt, was als akzeptabel bewertet werden kann.

Anschauungsgebundenes Denken

Die Reliabilitätsanalyse der Subskalen des Kognitiven Fähigkeitstest (KFT) von Heller und Perleth (2000) zum anschauungsgebundenen Denken ergibt auf Basis der Daten der Lehrgangsguppen für Cronbachs Alpha die Werte $\alpha_{N1} = .87$ sowie $\alpha_{N2} = .90$. Heller und Perleth (2000) geben im Rahmen der Reliabilitätsanalyse der Skalen den Konsistenz-Koeffizienten nach Kuder-Richardson an, der jedoch bei dichotomen Daten im Wesentlichen Cronbachs Alpha entspricht: Für N1 liegt die interne Konsistenz bei $r = .92$ und für N2 bei $r = .93$. Die interne Konsistenz der Skalen ist demnach mit der von Heller und Perleth (2000) angegebenen vergleichbar.

Interview

Im Rahmen der Auswertung der Interviews wurden auch hier 20% der Daten von zwei verschiedenen Kodierern auf Grundlage der Kodiermanuale (vgl. Kapitel 6.2.2) bewertet und als Maß der Übereinstimmung jeweils Cohens Kappa bestimmt. Bei der quantitativen Analyse ergibt sich mit $\kappa = .74$ eine gute bis sehr gute Übereinstimmung, die ebenfalls bei der qualitativen Auswertung erreicht wurde: $\kappa = .93$.

8.4.2 Analyse der Lernendenvariablen

8.4.2.1 Auswertung des anschauungsgebundenen Denkens

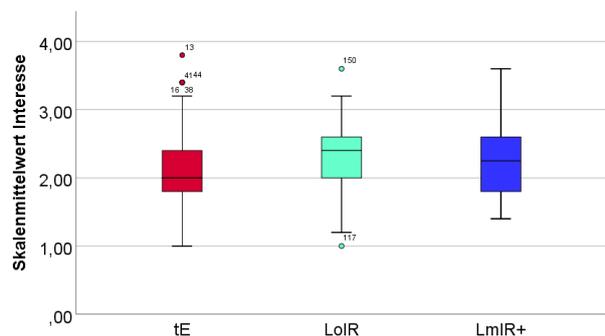
Die Vergleichbarkeit der Klassen in Bezug auf die kognitiven Fähigkeiten der Lernenden wird mit dem KFT kontrolliert. In diesem Zusammenhang wurden sowohl alle teilnehmenden Klassen sowie die Gruppen *traditioneller Energieunterricht (tE)*, *Lehrgang ohne IR-Kamera (LoIR)* sowie *Lehrgang mit IR-Kamera+ (LmIR+)* verglichen.

Es zeigen sich sowohl auf Klassenebene als auch auf Gruppenebene keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Indikators für die kognitiven Fähigkeiten (vgl. Abbildung 42, rechts).

8.4.2.2 Auswertung des fachspezifischen Interesses

Das fachspezifische Interesse wurde auf Klassen- sowie auf Gruppenebene ebenfalls hinsichtlich signifikanter Unterschiede untersucht. Zum Erhebungszeitpunkt T0 sind keine signifikanten Klassen- sowie Gruppenunterschiede festzustellen (vgl. Abbildung 42, links).

Fachspezifisches Interesse zum Zeitpunkt T0



Anschauungsgebundenes Denken

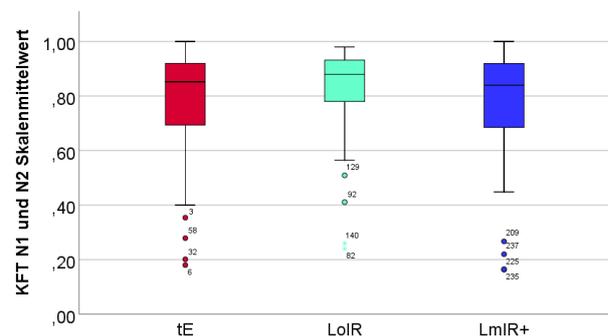


Abbildung 42: Gruppenvergleich der Skalenmittelwerte des fachspezifischen Interesses im Fach Physik zum Testzeitpunkt T0 (links) und des anschauungsgebundenen Denkens (rechts).

Insgesamt ergibt sich damit eine Vergleichbarkeit der Gruppen hinsichtlich der kontrollierten personenbezogenen Merkmale.

8.4.3 Ergebnisse zu den Forschungsfragen

8.4.3.1 Gruppenvergleich: Verständnisentwicklung hinsichtlich Entwertung und Erhaltung im traditionellen Energieunterricht gegenüber dem entwickelten Lehrgang (*Forschungsfrage 3*).

2. **Forschungsfrage 3** Inwiefern

- a) *führt der **Lehrgang** nach dem didaktischen Konzept Energieentwertung mit Fokus auf Transfer (ohne Einsatz der IR-Kamera) **gegenüber traditionellem Energieunterricht** zu einer Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung?*
- b) *gelingt durch den **Lehrgang** eine Anbahnung des Verständnisses für Energieerhaltung **gegenüber dem traditionellen Energieunterricht**?*

Für einen Vergleich der Lernwirksamkeit des entwickelten Lehrgangs mit *traditionellem* Unterricht sowie die Bewertung möglicher Unterschiede ist zunächst die Kenntnis der Lernziele, des Stundenumfangs sowie der Lerngelegenheiten des als traditionell bezeichneten Vergleichsunterrichts notwendig.

Analyse des traditionellen Energieunterrichts der Kontrollgruppen

Für die Analyse der Inhalte und Ziele des *traditionellen* Energieunterrichts wurden die teilnehmenden Lehrpersonen nach Ende der Unterrichtseinheit interviewt. Der Interviewleitfaden enthielt Fragen zum zeitlichen Umfang der gesamten Einheit und zu den einzelnen Aspekten, den Unterrichtsinhalten und Experimenten im Zusammenhang mit Entwertung und Erhaltung sowie den eingeführten Modellen. Die Angaben der Lehrpersonen wurden während des Gesprächs auf einem Protokollbogen verschriftlicht.

Im Rahmen der Interviews wurden die Lehrpersonen ebenfalls gebeten, die Ziele ihres Unterrichts mit den Zielen des entwickelten Lehrgangs zu vergleichen. Als Grundlage des Vergleichs diente eine tabellarische Übersicht über die Lernziele des entwickelten Lehrgangs. Dabei sollten die Lehrgangsziele, die nicht mit den Zielen ihres eigenen Lehrgangs übereinstimmen, gestrichen und zusätzliche Ziele ergänzt werden. Als weitere Datenquelle wurden Klassenbucheinträge herangezogen, welche die Themen der Unterrichtsstunden und wichtige Unterrichtsinhalte dokumentieren.

Tabelle 21 zeigt eine Gegenüberstellung der Inhalte des entwickelten Lehrgangs zu den Inhalten des traditionellen Energieunterrichts auf Basis der Ergebnisse der Interviews, des Zielvergleichs sowie den Klassenbucheinträgen. In beiden Lehrgängen identische Inhalte sind hervorgehoben.

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Unterrichtsgänge von traditionellem und Lehrgangsunterricht. Dabei werden nur Aussagen aufgeführt, die mindestens bei 2 der 3 Lehrpersonen genannt wurden. Überschneidungen sind dick gedruckt.

	traditioneller Energieunterricht	entwickelter Lehrgang
(durchschnittlicher) zeitlicher Umfang/ davon Entwertung	13h / 5h	14h / 6h
Schlüsselexperimente Entwertung	Keine konkreten Experimente durchgeführt; Entwertung thematisiert im Zusammengang mit: Flummi , Dynamot (Lampe wird warm), Veranschaulichungen: Hände reiben , IR-Video von einem Bohrer (youtube)	Wagen auf schiefer Ebene, Flummi und Klötze mit verschiedenen Oberflächen Zusatzhandlungen/IR-Kamera
Einführung von Erhaltung	Einführung <i>explizit</i> im Zusammenhang mit der Einführung des Kontomodells . <u>Eine Lehrperson führt Erhaltung nach Entwertung ein</u> (Erhaltung über Gedankenexperiment „wenn es keine Reibung geben würde“).	Einführung <i>implizit mit dem Kontomodell</i> . <u>Explizite Einführung erst nach der Entwertung</u> (Erhaltung über Gedankenexperiment „wenn es keine Reibung geben würde“)
Schlüsselexperimente Erhaltung	Faden pendel /Federpendel; Stationenlernen mit Hands-on Experimenten (Popper, Aufziehmaus, etc.)	Pendel (jedoch wird hier zunächst die Entwertung betont), Kugelhalfpipe
Betrachtung idealisierter (reibungsfreier) Vorgänge	Beim Flummi und Pendel, auch im Zusammenhang mit dem Perpetuum mobile Es wurden hier Situationen wie eine <u>Kugelachterbahn</u> sowie eine Halfpipe betrachtet	Betrachtung lediglich am Ende des Lehrgangs im Zusammenhang mit der Halfpipe (vorherige Betrachtung der Reibung)
Thematisierung von Energieverbrauch	Verbrauch wurde in Umwandlung umgedeutet . Bedeutung, dass die Energie in der Luft etc. nicht mehr weiter nutzbar ist	Energie, die in innere Energie umgewandelt wurde, ist für den ursprünglichen Vorgang nicht mehr nutzbar
Eingeführte Modelle	Kontomodell, Energieflussdiagramm	Adaptiertes Kontomodell, Energieflussdiagramm
Rolle der Modelle im Unterricht	Zentrale Rolle bei der Beschreibung der Vorgänge , Argumentationshilfe, Gesprächsanlass	Zentrale Rolle bei der Beschreibung der Vorgänge

Es ist festzustellen, dass im traditionellen Unterricht bei zwei von drei Klassen keine Einführung der Temperatur als Messgröße stattfand (vgl. 1. Doppelstunde, Kapitel A.1). Ebenso wurde in den Lehrgängen des Vergleichsunterrichts auf die Einführung des Teilchenmodells verzichtet (vgl. 12. Doppelstunde, Kapitel 5.2.7). Alle Lehrpersonen haben keine explizite Unterscheidung zwischen Energieform und Indikator vorgenommen, jedoch den Einfluss von Messgrößen auf die Energie in „je-desto“-Form beschrieben. Dabei wurde im Zusammenhang mit der Bewegungsenergie lediglich der Einflussfaktor Geschwindigkeit betrachtet, der

Einfluss der Masse wurde nicht berücksichtigt (vgl. 3. und 5. Doppelstunde, Kapitel A.5 und A.7). Weiterhin wurden vereinzelt Teilziele gestrichen, die sich speziell auf die Lernhandlungen einer Stunde beziehen wie beispielsweise „Die Schülerinnen und Schüler sollen *verschiedene Kugeln* anhand der auftretenden Energieentwertung vergleichen können“ (vgl. Anhang A.15, S. 255).

Nur eine Lehrperson hat weitere Ziele ergänzt, wobei es sich hierbei um Lernziele handelt, die dem Aspekt Entwertung zugeordnet werden können: „Die Schülerinnen und Schüler können zwischen innerer Energie und Temperatur unterscheiden“, „Die Schülerinnen und Schüler beschreiben, dass eine Wärmeübertragung von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur stattfindet und erläutern das Erreichen eines Temperaturnausgleichs“. Diese Ziele gehen über die im Kerncurriculum ausgewiesenen Kompetenzen für den Jahrgang 7/8 hinaus (vgl. Kapitel 2.3).

Zusammengefasst stimmen die Ziele des hier als traditionell bezeichneten Energieunterrichts bis auf wenige Ausnahmen mit den Zielen des entwickelten Lehrgangs überein. Ebenfalls fällt auf, dass in weiten Teilen dieselben Experimente durchgeführt wurden, sodass der angestrebte Rückgriff auf traditionelle Experimente gelungen ist. Jedoch wird deutlich, dass bei den Experimenten der Fokus der Betrachtung teilweise auf die Energieerhaltung gelegt worden ist und Entwertung als Ursache für die „Verletzung“ der Erhaltung eingeführt wurde. Trotzdem wurde in diesem Zusammenhang der Energietransport in die Umgebung und die Folge der Temperaturerhöhung thematisiert. Dabei ist der Umfang der Unterrichtszeit, in der über Entwertung gesprochen wurde, nahezu identisch mit der im Lehrgang veranschlagten Unterrichtszeit.

Zwei der drei Lehrpersonen gaben in vier Doppelstunden explizit als Stundenthema Energieerhaltung an, während im entwickelten Lehrgang nur in zwei Doppelstunden eine explizite Thematisierung stattfand.

Verständnis für Entwertung und Erhaltung

Zur Analyse werden einerseits die Daten des **Energietests** und andererseits die **Interviewda-**ten herangezogen (vgl. Kapitel 6.2). Obwohl mittels der Erhebungsinstrumente ebenfalls Da-ten zu den Aspekten *Formen* sowie *Umwandlung und Transfer* erhoben wurden, wird mit Blick auf die Forschungsfragen ausschließlich von den Ergebnissen der Aspekte *Entwertung* und *Erhaltung* ausführlicher berichtet (Forschungsfrage 3, Abbildung 43, roter Kasten).

Zusammenfassend liegt in beiden Gruppen beim Pretest zum Zeitpunkt T0 ein niedriges Ver-ständnis der Aspekte *Formen*, *Umwandlung und Transfer* vor, wobei keine Gruppenunter-schiede feststellbar sind. Bei beiden Gruppen kann im Vergleich von T0 zu T2 eine signifikante Steigerung im Verständnis für Formen, Umwandlung und Transfer mit einem großen Effekt festgestellt werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass in beiden Gruppen eine Verständnisenwick-lung hinsichtlich der Aspekte *Formen*, *Umwandlung und Transfer* stattgefunden hat (vgl. Ab-bildung 43).

**Ergebnisse des Energietests für die Aspekte der Energiequadriga
zu den Zeitpunkten T0 und T2**

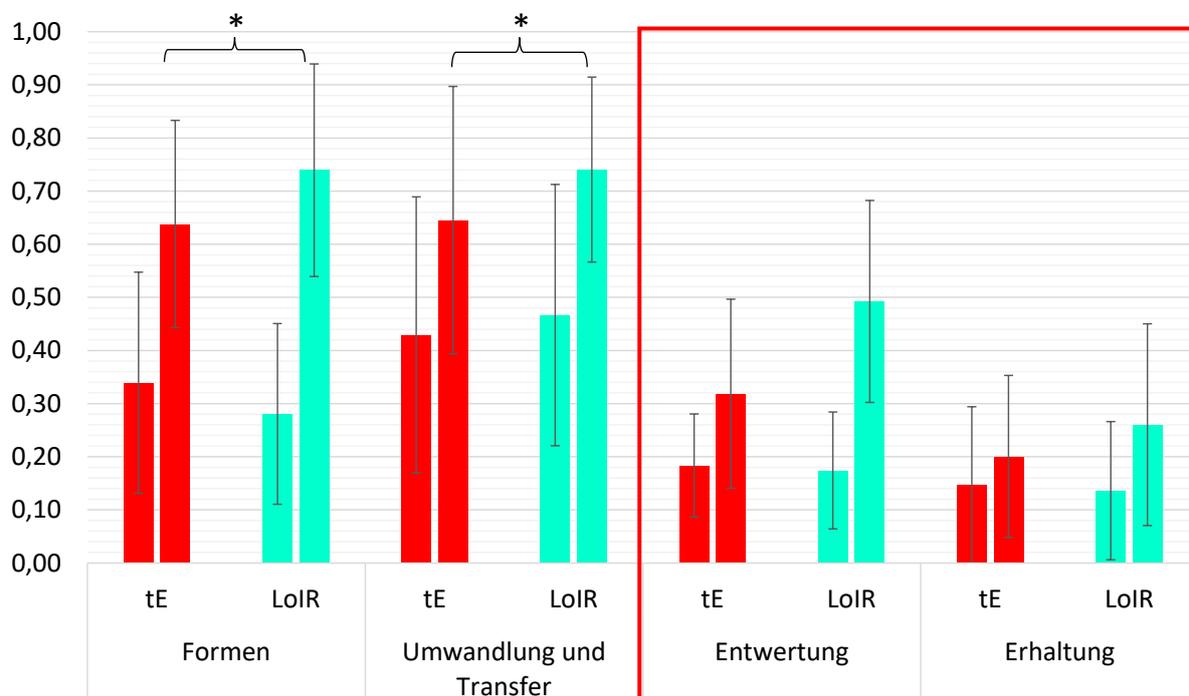


Abbildung 43: Balkendiagramm der Ergebnisse des Energietests für die Gruppen tE und LoIR; aufgetragen wurden die Skalennittelwerte in Prozent.

Jedoch erzielte die LoIR gegenüber der Gruppe tE hinsichtlich der Aspekte *Energieformen* sowie *Energieumwandlung und -transfer* ein signifikant höheres Verständnis zum Zeitpunkt T2, bei einem durchschnittlichen bis großen Effekt. Eine mögliche Erklärung für diesen

Unterschied kann die unterschiedliche Thematisierung des Einflussfaktors Masse auf Höhen- und Bewegungsenergie im traditionellen Unterricht sein, welcher hier weniger ausführlich behandelt wurde als in der Lehrgangsguppe.

Energietest⁵⁹

Beim Aspekt Entwertung kann in beiden Gruppen eine signifikante Zunahme im Verständnis von T0 zu T2 mit einem großen Effekt festgestellt werden (tE: $z = -5.18$, $p = .00$, $w = .60$; $1-\beta = .99$; LoIR: $z = -5.99$, $p = .00$, $w = .71$, $1-\beta = .99$, vgl. Abbildung 44). Die Datenanalyse bezüglich des Aspekts Erhaltung zeigt ebenfalls in beiden Gruppen einen signifikanten Zuwachs mit großem Effekt (tE: $z = -4.319$, $p = .00$, $w = .51$, $1-\beta = .99$; LoIR: $z = -4.17$, $p = .00$, $w = .48$; $1-\beta = .99$, vgl. Abbildung 44).

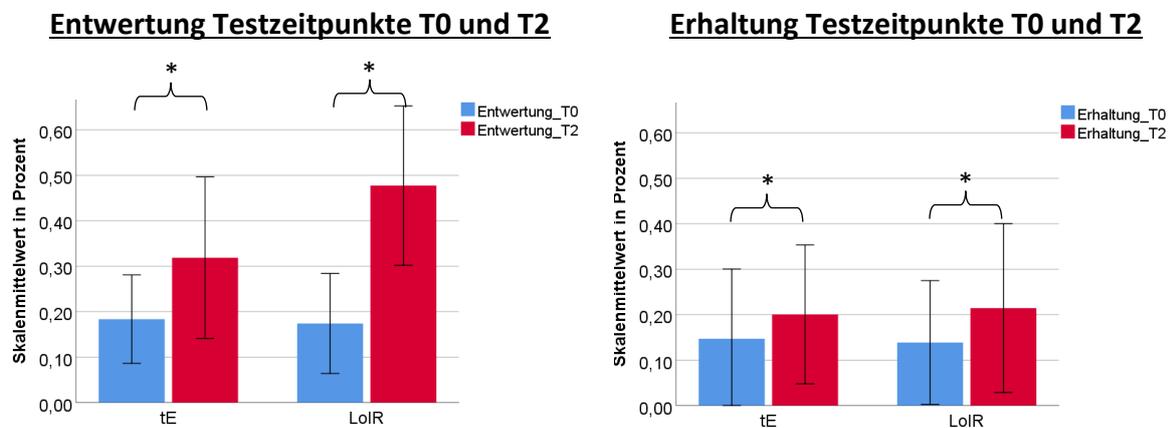


Abbildung 44: Vergleich der Testzeitpunkte T0 zu T2 auf Grundlage der Energietestdaten für die Aspekte Entwertung und Erhaltung in den Gruppen tE und LoIR, Skala in Prozent.

Im Weiteren wurden die Gruppen bezüglich der Aspekte Energieentwertung und Energieerhaltung auf signifikante Unterschiede geprüft. Während sich im Pretest noch keine Gruppenunterschiede hinsichtlich der beiden Aspekte ergeben, ist im Posttest beim Aspekt Energieentwertung ein signifikanter Gruppenunterschied zugunsten der Gruppe LoIR festzustellen ($z = -5.254$, $p = .00$, $w = .43$, $1-\beta = .99$, vgl. Abbildung 45). Beim Aspekt der Energieerhaltung ist ebenfalls ein Gruppenunterschied mit kleinem Effekt für die Gruppe LoIR feststellbar ($z = -2.206$, $p = .027$, $w = .18$, $1-\beta = .71$, vgl. Abbildung 45).

⁵⁹ Auch hier wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit und aufgrund einer zu hohen Itemschwierigkeit die Items 13 und 30 nicht in die Auswertung einbezogen (vgl. Kapitel 7.3.2).

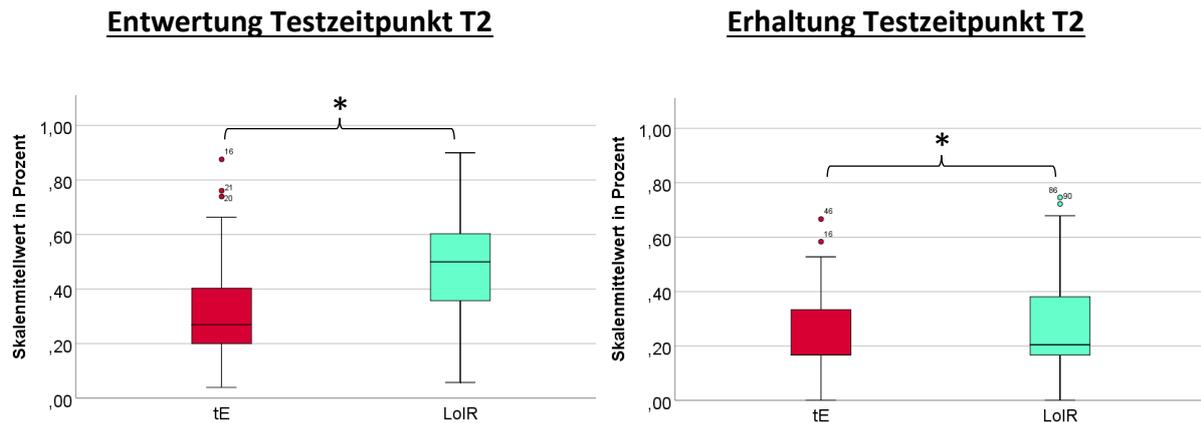


Abbildung 45: Gruppenvergleich der Aspekte Entwertung und Erhaltung auf Grundlage der Energietestdaten zum Zeitpunkt T2.

Interview

1. Quantitative Analyse

Die Ergebnisse des Energietests werden durch die Auswertung der Interviews bestätigt, wobei für den Aspekt Entwertung (tE: $z = -2.21$, $p = .027$, $w = .74$, $1-\beta = .91$; LoIR: $z = -2.38$, $p = .018$, $w = .84$, $1-\beta = .99$) und für Erhaltung (tE: $z = -1.69$, $p = .091$, $w = .56$, $1-\beta = .57$; LoIR: $z = -2.21$, $p = .027$, $w = .78$, $1-\beta = .93$) signifikante Steigerungen mit großem Effekt festzustellen sind (vgl. Abbildung 46).

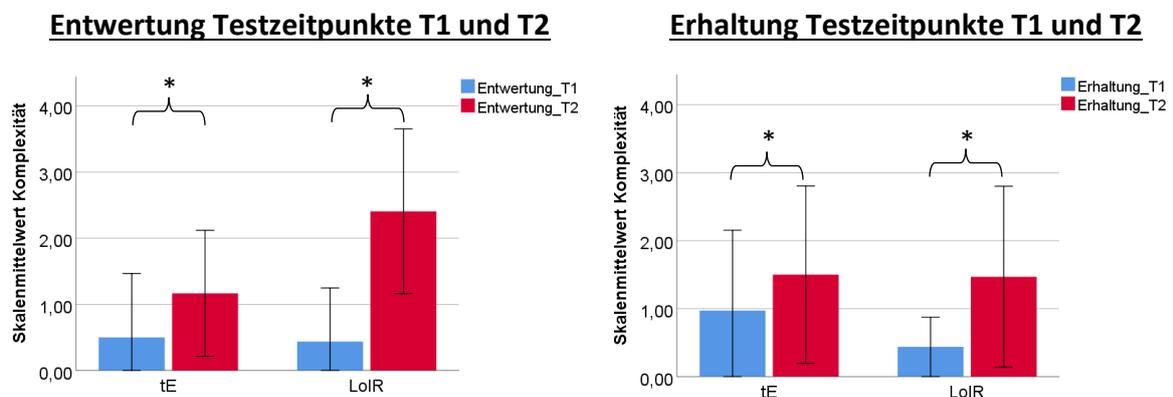


Abbildung 46: Vergleich der Testzeitpunkte T0 zu T2 auf Grundlage der Interviewdaten für die Aspekte Entwertung und Erhaltung in den Gruppen tE (N=9) und LoIR (N=8), aufgetragen sind die Skalennittelwerte der erreichten Komplexität.

Im Gruppenvergleich ist zum Testzeitpunkt T1 kein Gruppenunterschied feststellbar. Zum Testzeitpunkt T2 ergibt sich für die Gruppe LoIR ein signifikant höheres Verständnis für den Aspekt Entwertung ($z = -1.90$, $p = .029$, $w = .46$, $1-\beta = .65$), wobei für den Aspekt Erhaltung kein Unterschied feststellbar ist (vgl. Abbildung 47).

Während die Gruppe tE beim Aspekt Entwertung im Mittel die Komplexität *Fakten bis Zuordnung* erreichte, erzielte die Gruppe LoIR eine mittlere Komplexität im Bereich

Zusammenhänge. Beim Aspekt Erhaltung erreichten beide Gruppen im Mittel die Komplexität *Fakten bis Zuordnung*.

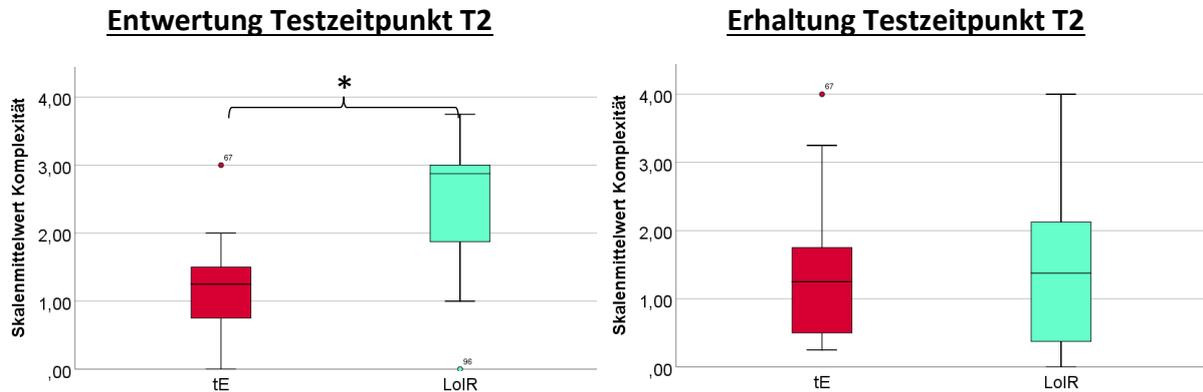


Abbildung 47: Gruppenvergleich Aspekte Entwertung und Erhaltung auf Grundlage der Interviewdaten zum Zeitpunkt T2 in den Gruppen tE (N = 9) und LoIR (N = 8).

2. Qualitative Analyse

Ziel der qualitativen Analyse ist es, Informationen darüber zu erhalten, wie sich der im Rahmen der quantitativen Analyse festgestellte Gruppenunterschied in den Interviews manifestiert. Hierfür werden die Interviewskripte nach der in den Kapiteln 6.2.2 beschriebenen Vorgehensweise analysiert und bei den einzelnen Szenarien Aussagen der Untersuchungsgruppen exzerpiert. Anhand dieser Aussagen können Rückschlüsse darauf gezogen werden, worin sich die Vorstellungen der interviewten Schülerinnen und Schüler bei den Aspekten Entwertung und Erhaltung unterscheiden.

Es erfolgt eine Zuordnung der Teilnehmenden hinsichtlich ihrer Leistungsstärke nach Einschätzung der Physiklehrkraft zu den Kategorien *leistungsstark*, *mittelmäßig* und *schwach*, die im Code mittels Sternchen gekennzeichnet ausgewiesen wird (vgl. Tabelle 22, siehe Kapitel 6.2.2).

Tabelle 22: Zuordnung der Teilnehmenden zu den Kategorien leistungsstark, mittelmäßig und leistungsschwach.

Vergleichsgruppe	eingeschätzt als leistungsstark***	eingeschätzt als mittelmäßig**	eingeschätzt als leistungsschwach*
tE	tE_D*** tE_E***	tE_A** tE_C** tE_H** tE_I**	tE_B* tE_F* tE_G*
LoIR	LoIR_A*** LoIR_G***	LoIR_D** LoIR_E** LoIR_H**	LoIR_B* LoIR_C* LoIR_F*

Im Rahmen der Interviews wurden die Teilnehmenden der Lehrgangsguppen aufgefordert, zu den jeweiligen Szenarien das zugehörige Energiekontomodell mit den dafür im Unterricht eingeführten Karten zu legen. Dabei handelt es sich um das entwickelte Kontomodell *mit Fokus auf Transfer* (vgl. Kapitel 5.1), welches im Unterricht zur Vi-

#P = Anzahl der Personen

dAG = durchschnittlicher Ausprägungsgrad

fettgedruckt = $\#P \geq \frac{N}{2}$

graue Markierung: In beiden Gruppen identifizierte Aussage.

ingerückte Zeilen: Aussage ist in Verbindung mit der Aussage darüber zu sehen.

sualisierung der Vorgänge verwendet wurde. Da dieses Modell in der traditionellen Gruppe nicht eingeführt wurde und die Teilnehmenden noch nie mit den Karten gearbeitet haben, wurden diese aus Gründen der Vergleichbarkeit aufgefordert, das ihnen bekannte Energiekontomodell des Prozesses anzufertigen. Im Gegensatz zum Lehrgangmodell hat die Gruppe des traditionellen Energieunterrichts ein Modell verwendet, bei dem die Energieformen in getrennten Säulen betrachtet werden (vgl. Abbildung 15). Die Füllhöhen ergeben addiert die gesamte Säulenhöhe. Dabei stellt das adaptierte Modell eine Variante des im traditionellen Unterricht verwendeten Modells dar, welches um das System *Umgebung* erweitert wurde (vgl. Kapitel 5.1). Auch wenn die Fotos der angefertigten Kontomodelle nicht gesondert kodiert wurden, ist somit dennoch eine grundsätzliche Vergleichbarkeit der Modelle gegeben.

Entwertung

Die quantitative Analyse der Interviewdaten zeigt, dass die Gruppe LoIR ein signifikant höheres Verständnis für Energieentwertung erreicht als die Gruppe tE. Im Rahmen der folgenden qualitativen Analyse wird sich zeigen, dass sich dieser Unterschied insbesondere darin manifestiert, dass die Gruppe tE die Vorgänge kontextunabhängig weitgehend idealisiert betrachtet, sodass sich insgesamt nur wenige Aussagen zur Entwertung identifizieren lassen. Äußerungen zur Energieentwertung der Gruppe tE bleiben gegenüber der Gruppe LoIR eher unspezifisch, da der Entwertungsprozess nicht näher beschrieben wird. Ebenfalls zeigt sich bei den Teilnehmenden der Gruppe tE vermehrt eine Unsicherheit bei der Zuordnung einer Energieform nach Prozessende.

Begriffsverständnis

Wie bereits in der Gruppe LoIR kann auch in der Gruppe tE bei vier interviewten Teilnehmenden unabhängig von der Aufgabenstellung ein fehlerhaftes Verständnis des Begriffs *Entwertung* festgestellt werden. Drei Teilnehmende beschrieben den Begriff allgemein durch das Verschwinden von Energie bzw. einer Energieform:

tE_F***: „Ähm, ich glaube, sobald er halt aufkommt und länger liegt hat er halt, verliert er halt an Energie und ist dann... wird dann halt zur entwerteten Energie.“

tE_B*: „Und am tiefsten Punkt der Rutsche, am 3. halt, hört die Höhenenergie dann praktisch auch auf und die Bewegungsenergie, je nachdem ob das Kind dann halt weiterläuft oder nicht, wird auch entwertet.“

Dies deutet auf ein fehlerhaftes Begriffsverständnis hin. Jedoch können in beiden Gruppen bei diesen Teilnehmenden ebenfalls anknüpfungsfähige Aussagen identifiziert werden, die teilweise ebenfalls der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet wurden.

Aufgabe 1: Der Skater auf der Halfpipe

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren. Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

In der Gruppe tE können insgesamt nur wenige Aussagen dem Aspekt Energieentwertung zugeordnet werden (vgl. Tabelle 23). Keiner der Teilnehmenden der Gruppe tE beschreibt eine Umwandlung von Energie in innere Energie. Auch in den angefertigten Energiekontomodellen wird von keiner*keinem Teilnehmenden eine Säule für innere Energie gezeichnet (vgl. bspw. Abbildung 48).

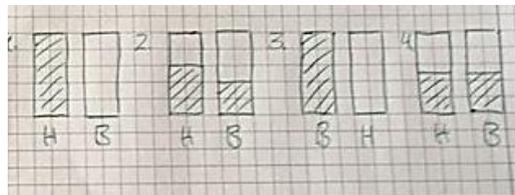


Abbildung 48: Kontomodell von tE_D*** im Rahmen von Aufgabe 1.

Ein*e Teilnehmende*r erklärt dies damit, dass entwertete Energie nicht so einfach zu bestimmen sei:

tE_F***: „Weil man dann trotzdem noch entwertete Energie hätte, die man dann auch noch, glaube ich, im Diagramm zeichnen könnte, aber das macht man nicht da man die nicht so gut bestimmen kann, glaube ich.“

Zwei als mittelmäßig eingeschätzte Teilnehmende erklären die Abnahme der erreichten Höhe des Skaters mit fehlendem Schwung und bleiben in ihren Beschreibungen somit auf einer alltagssprachlichen Ebene. In der Gruppe tE konnten jedoch ebenfalls Aussagen identifiziert werden, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden können. Dabei handelt es sich zum einen um die Energieübertragungsvorstellung, die in Zusammenhang mit der Abnahme der Skatehöhe gebracht werden kann:

tE_E***: „Und ähm irgendwann ist dann auch, dass das in diese Energie entwertet wird, also nicht ganz weg ist, sondern einfach nur so an die Luft abgegeben wird. [...] dann würde er immer niedriger fahren, also er würde immer weniger weit kommen, weil immer mehr Energie entwertet wird, bis sie dann irgendwann völlig entwertet wurde.“

Tabelle 23: Identifizierte Aussagen zum Aspekt Entwertung im Rahmen von Aufgabe 1.

Aufgabe 1: Entwertung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachegebrauch/Erfahrungswissen	Im Laufe des Prozesses nimmt die Reibung zu.			2	0,13
	Mit geringer werdender Höhe nimmt der Schwung ab, deswegen bleibt der Skater stehen.	2	0,11		
	Entwertete Energie lässt sich nicht so einfach bestimmen.	1	0,06		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Situative Betrachtung der inneren Energie ⁶⁰ .			1	0,06
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt,			6	0,69
	dadurch wird das Skateboard gebremst.			1	0,13
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.			3	0,25
	Es wird (durch Reibung) Energie in die Umgebung abgegeben,	2	0,11	5	0,56
	dadurch bleibt der Skater irgendwann stehen.	2	0,11	1	0,06
	Die Energie verteilt sich in der Umgebung.			2	0,06
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.	3	0,28	3	0,25

Zum anderen erläutern drei Teilnehmende dieser Gruppe, dass Energie ihren Nutzen verlieren kann:

tE_H***: „[...] dass er halt die Energie irgendwie in eine andere Energie umwandelt die er dann halt nicht mehr benutzen kann.“

Jedoch erreichen diese Aussagen einen niedrigeren durchschnittlichen Ausprägungsgrad als in der Gruppe LoIR. Die phänomenologischen Auswirkungen des beschriebenen Energieentwertungsprozesses für den Vorgang des Skatens erläutern jedoch in beiden Gruppen nur einzelne Teilnehmende.

⁶⁰ Hiermit ist gemeint, dass diese Schülerinnen und Schüler die innere Energie nicht addiert über den gesamten Prozess betrachten, sondern in jeder Situation die aktuelle Umwandlung bzw. den Transfer beschreiben.

Aufgabe 2: Der fallende Stein

Du hebst einen Stein hoch und lässt ihn fallen. Was kannst du über die Energie des Steins sagen?

Zwei Drittel der Teilnehmenden der Gruppe tE äußert bei diesem Vorgang eine Unsicherheit der Zuordnung einer Energieform nach Prozessende (vgl. Tabelle 24):

tE_F**: „dann hat er am Ende, wenn er ihn fallen lässt, verliert er halt an nimmt er halt, um sich zu bewegen, an Bewegungsenergie zu und nimmt dann an Höhenenergie ab, aber ich weiß nicht, welche Energie hat, wenn er da liegt.“

Die Hälfte der Teilnehmenden dieser Gruppe gibt an, dass die Energie am Ende des Prozesses entwertet werde, jedoch werden von diesen Teilnehmenden keine weiteren Angaben zum Entwertungsprozess gemacht:

tE_I**: also ich bin mir jetzt beim letzten nicht ganz so sicher, ich glaube, beim letzten könnte es halt vielleicht auch sein, dass die Energie entwertet ist. [...] Und deswegen bin ich mir bei dem Stein nicht sicher und ich glaube, dass beim Stein eine entwertete Energie am letzten Punkt ist und weil es einfach der tiefste ist.

Tabelle 24: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 2.

Aufgabe 2: Entwertung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
	Keine Vorstellung zum Bewegungsablauf.			1	0,00
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Luftwiderstand wird der Stein gebremst.			1	0,06
	Die Luftreibung erwärmt den Stein und die Luft.			2	0,06
	Unsicherheit bei der Zuordnung der Energieform nach Prozessende.	6	0,44		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Hier gibt es keine innere Energie aufgrund geringer oder fehlender Reibung.			3	0,19
	Die abgegebene Energie ist Bewegungsenergie.			2	0,19
	Am Ende des Prozesses wird die Energie entwertet.	5	0,39		
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt.			3	0,38
	Energie wird (durch Reibung) in die Umgebung abgegeben,	2	0,17	6	0,69
	dann hat der Stein keine Energie mehr.			2	0,19
	In der Umgebung verteilt sich die Energie.			3	0,19
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.			3	0,31

Während die Mehrheit der Teilnehmenden der Gruppe LoIR beim Alltagsszenario des fallenden Steins einen Energietransport vom Stein zum Boden mit erhöhtem durchschnittlichen Ausprägungsgrad beschreibt, äußern sich nur zwei Teilnehmende aus der Gruppe tE über einen möglichen Energietransfer:

tE_E***: „Durch den Druck da unten, wo dann wieder Bewegung noch höher ist, also das ist dann der unterste Punkt da, wird mit diesem Druck beim Aufprall an die Luft abgegeben. Oder entwertet.“

Hier wird der Energietransfer scheinbar jedoch nicht mit Energieentwertung in Verbindung gebracht.

Aufgabe 3: Das rutschende Kind

Ein Kind sitzt oben auf einer Rutsche und möchte gleich losrutschen. Was kannst du über die Energie des Kindes sagen?

Auch beim rutschenden Kind beschreibt die Mehrheit der Teilnehmenden der Gruppe LoIR die Umwandlung von Energie in innere Energie (vgl. Tabelle 25), wobei die Hälfte der Teilnehmenden dieser Gruppe ebenfalls auf die Übertragung von Energie in die Umgebung eingeht. Die erläuterten Vorgänge werden im Energiekontomodell berücksichtigt. Demgegenüber beschreiben in der Gruppe tE nur einzelne Teilnehmende eine Umwandlung in innere Energie:

tE: H** : „Nein, vielleicht wird irgendwas mit Wärmeenergie umgewandelt wegen der Reibung oder so? Weiß ich nicht.“

Beispielsweise berücksichtigt tE_C** „Reibungsenergie“ beim Zeichnen des Energiekontos (vgl. Abbildung 49).

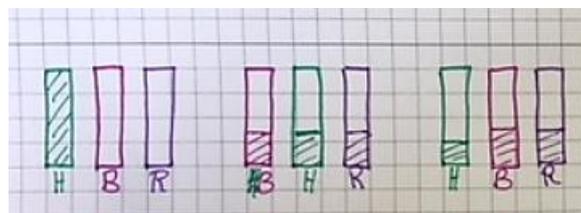


Abbildung 49: Energiekonto von tE_C** im Rahmen von Aufgabe 3. R: Reibungsenergie.

Tabelle 25: Identifizierte Aussagen zum Aspekt Entwertung im Rahmen von Aufgabe 3.

Aufgabe 3: Entwertung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprache- brauch/Erfahrungswissen	Situative Betrachtung der inneren Energie.			1	0,06
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Bei diesem Vorgang gibt es keine innere Energie.			1	0,06
	Entwertung passiert nur am Ende des Vorgangs.	5	0,39		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Unsicherheit bei der Zuordnung der Energieform zu Prozessende.	5	0,28		
	Durch die Reibung hat die Rutsche mehr Energie, wird nicht abgegeben.			1	0,06
	Während des Rutschens gibt es Reibungsenergie.	1	0,11		
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt,	1	0,06	7	0,75
	dadurch wird das Kind gebremst.			1	0,06
	Am Ende der Rutsche gibt es nur noch innere Energie.			2	0,13
	Energie wird (durch Reibung) an die Umgebung abgegeben.	2	0,11	4	0,38
	Durch die Reibung wird die Rutsche erwärmt, daher wird innere Energie in die Umgebung abgegeben.			1	0,13
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.			3	0,19
	Die Menge der inneren Energie (entwerteten Energie) nimmt im Laufe des Prozesses zu.	2	0,11	3	0,19

Eine Vielzahl der Teilnehmenden dieser Gruppe erläutert, dass Energie nur gegen Ende des Rutschvorgangs entwertet werde:

tE_I**: „Also ich gehe jetzt davon einfach mal aus, dass der tiefste Punkt jetzt hier ist, also hinter der Rutsche. Dann würde ich einfach sagen, dass soll halt auch wieder entwertete Energie sein, weil er halt auch wieder am tiefsten Punkt ist und es keine Höhenenergie mehr geben kann und auch weil er sich nicht mehr bewegt, ja.“

Es wird deutlich, dass hier mithilfe der Indikatoren Höhe und Bewegung die Energieformen Höhen- und Bewegungsenergie am Ende des Vorgangs ausgeschlossen und dann auf entwertete Energie geschlossen wird.

In der Gruppe tE kann bei über der Hälfte der Teilnehmenden eine Unsicherheit bei der Zuordnung einer Energieform zu Prozessende beobachtet werden. Ursache für diese

Unsicherheit scheint beispielsweise das Fehlen eines beobachtbaren Indikators am Ende des Vorgangs zu sein:

tE_H**: „Weil, Bewegungsenergie kann es nicht sein, weil er sich nicht mehr bewegt und Höhenenergie auch nicht, weil er ganz unten ist und ich wüsste nicht was für eine Energieform noch da sein sollte.“

Aufgabe 4a: Pendel ohne Motor

Ein Pendel ist an einem Motor befestigt. Du lenkst es aus und lässt es los. Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor ausgeschaltet ist?

Während von zwei Dritteln der Teilnehmenden der Gruppe LoIR Aussagen zur Umwandlung von Energie in innere Energie und Energieübertragung auf die Aufhängung getroffen werden, äußern sich nur einzelne Teilnehmende der Gruppe tE über die Entwertung von Energie beim Pendeln (vgl. Tabelle 26). Dabei bleiben die Äußerungen eher unspezifisch, da zwar Energieentwertung als Ursache für die Abnahme der Pendelamplitude genannt, der Entwertungsprozess jedoch nicht näher erläutert wird:

tE_F**: *Dass die Energie entwertet wird halt... das Pendel halt nutzt halt die Energie halt erstmal, um immer wieder hoch zu kommen und dann wird immer mehr Energie entwertet und dann hat am Ende nicht mehr genug Energie.*

Weiterhin geben Teilnehmende dieser Gruppe an, dass das Pendel durch fehlenden Schwung zum Stehen käme oder sie können keine Ursache für die Abnahme der Höhe benennen.

Bei einer* einem Teilnehmenden entsteht durch die Auseinandersetzung mit dem angefertigten Kontomodell ein kognitiver Konflikt, da ohne die Berücksichtigung der Energieentwertung der Umwandlungsprozess von Höhen- und Bewegungsenergie nie enden würde und somit das Pendel nie zum Stillstand käme:

tE_A**: „Also das ist eben die Frage... Also eigentlich müsste das Pendel genau wieder nach oben kommen. Aber dann verstehe ich nicht, also weiß ich nicht ganz warum das Pendel dann immer weniger wird. Aber eigentlich müsste es, wenns wirklich hier oben startet, dann müsste es auch genau wieder hier oben ankommen.“

Tabelle 26: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 4a.

Aufgabe 4a): Entwertung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprache- brauch/Erfahrungswissen	Die Höhe nimmt aufgrund des fehlenden Schwungs ab.			2	0,13
	Man würde Wärme spüren, wenn man die Aufhängung berührt.			2	0,19
	Die Höhe nimmt ab, da das Pendel keinen Schwung mehr hat.	3	0,17		
Kognitiver Konflikt	Die Ursache für die Abnahme der Amplitude ist unklar.	1	0,06		
	Unsicherheit bei der Zuordnung der Energieform nach Prozessende.	1	0,06	1	0,06
	Das Pendel schwingt aus, aber eigentlich müsste sich Höhenenergie immer wieder in Bewegungsenergie umwandeln.	1	0,11		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Hier gibt es keine innere Energie (aufgrund fehlender Reibung).			2	0,13
	Energie wird nur am Ende entwertet.	1	0,11		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Situative Betrachtung der inneren Energie.			1	0,06
	Die Energie wird in eine unsichtbare Form umgewandelt.	1	0,06		
	Die Energie wird nur am Ende entwertet,	2	0,11		
	dadurch bleibt das Pendel stehen.	2	0,11		
Lehrgangsvorstellungen	Im Laufe des Pendelns wird Energie entwertet,	2	0,17		
	dadurch schwingt das Pendel nicht mehr so hoch	2	0,11		
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.	1	0,11		
	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt.	1	0,06	6	0,63
	Die Menge an innerer Energie (entwerteter Energie) nimmt im Laufe des Prozesses zu.			1	0,06
	Energie wird (durch Reibung) in an die Luft/Aufhängung abgegeben,	2	0,11	5	0,56
	deshalb schwingt das Pendel aus/nicht mehr hoch.			1	0,13

Zwei Teilnehmende der Gruppe tE benennen die Energieentwertung zwar als Ursache für die Abnahme der Pendelamplitude, jedoch beschreiben sie, dass Energieentwertung nur zu einem bestimmten Zeitpunkt auftritt und nicht während des gesamten Prozesses:

tE_E***: „Also, wenn ich es jetzt so recht überlege... nein ich glaube die Energie wird... hier kurz vor der Stelle hier oben entwertet, weil es da nicht mehr ganz nach oben kommt.“

Dies wird ebenfalls in dem angefertigten Kontomodell dargestellt, welches nur am Ende eine Säule für entwertete Energie aufweist (vgl. Abbildung 50).

Insgesamt wird entwertete Energie nur in zwei Kontomodellen von Teilnehmenden dieser Gruppe berücksichtigt, die als leistungsstark bzw. mittelmäßig eingeschätzt wurden. Demgegenüber legten in der

Gruppe LoIR lediglich zwei als leistungsschwach eingeschätzte Teilnehmende mit den Energiekontokarten einen Umwandlungsprozess ohne Berücksichtigung der inneren Energie.

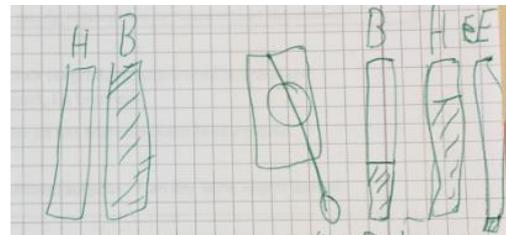


Abbildung 50: Kontomodell von tL_E*** im Zusammenhang mit Aufgabe 4a. eE: entwertete Energie.

Aufgabe 4b: motorisiertes Pendel

Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor eingeschaltet ist?

Insgesamt können nur bei wenigen Teilnehmenden Aussagen dem Aspekt der Energieentwertung zugeordnet werden, wobei keine identischen Aussagen identifiziert wurden (vgl. Tabelle 27).

Während einzelne Teilnehmende der Gruppe LoIR auch beim motorisierten Pendel die Umwandlung von Energie in innere Energie beschreiben und von einer Zunahme der Menge an innerer Energie sprechen, äußern ein Drittel der Teilnehmenden der Gruppe tE, dass durch den Motor keine Energie entwertet würde:

tE_B*: „Und wenn das Pendel dann halt hier am höchsten Punkt ist, dann schwingt es halt nicht aus, sondern schwingt immer weiter, bis wieder an den höchsten Punkt, weil der Motor es ja halt antreibt. [...] Da wird dann nichts entwertet.“

Zwei Teilnehmende aus dem oberen Leistungsspektrum der Gruppe tE beschreiben, dass das Pendel trotz Energieentwertung immer weiter schwingt, da der Motor wieder Energie hinzufügt:

tE_D***: „Nur dass der halt die Maximalhöhe sozusagen nicht immer tiefer wird, immer weniger wird, sondern dass das immer an die gleiche Höhe wieder zurückgeht. [...] Weil da diese elektrische Energie halt hinzugefügt wird und ... die dann halt vielleicht in diese Höhen und die Bewegungsenergie halt umgewandelt wird.“

Tabelle 27: Identifizierte Aussagen zum Aspekt Entwertung im Zusammenhang mit Aufgabe 4b.

Aufgabe 4b): Entwertung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Motor hat das Pendel überall dieselbe Geschwindigkeit.			1	0,06
	Man würde Wärme spüren, wenn man die Aufhängung berührt.			1	0,06
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Hier gibt es keine Reibung.			1	0,06
	Mit Motor würde keine Energie entwertet.	3	0,22		
Kognitiver Konflikt	Es wird auch mit Motor Energie in die Umgebung abgegeben, aber das Pendel erreicht trotzdem wieder dieselbe Höhe, das verstehe ich nicht.			1	0,13
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt.			2	0,19
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.			2	0,13
	Durch den Motor wird die innere Energie ausgeglichen.			1	0,06
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.	1	0,06		
	Obwohl Energie entwertet wird, stoppt das Pendel nicht, da vom Motor Energie hinzugefügt wird.	2	0,17		

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Aspekt Entwertung wurden insgesamt nur einzelne Aussagen identifiziert, die in beiden Gruppen geäußert wurden. Dabei ergibt sich bei der Gruppe tE anhand der Aussagen ein eher inhomogenes Bild des vorliegenden Energieverständnisses, da viele Aussagen nur von einzelnen Teilnehmenden getätigt wurden. Demgegenüber lassen sich in der Gruppe LoIR bei der Mehrzahl der Szenarien Aussagen mit erhöhtem durchschnittlichem Ausprägungsgrad identifizieren, die einer Vielzahl der Teilnehmenden zugeordnet werden konnten. Dabei handelt es sich weitgehend um Aussagen, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden konnten.

Im Zusammenhang mit den periodischen Prozessen der Aufgaben 1 und 4a beschreibt eine Mehrheit der Teilnehmenden der Gruppe LoIR die Umwandlung von Energie in innere Energie sowie einen Energietransfer in die Umgebung. Demgegenüber wird der Umwandlungsprozess in der Gruppe tE von nahezu allen Teilnehmenden zunächst idealisiert beschrieben. Äußerungen zur Energieentwertung bleiben eher unspezifisch, da der Vorgang des Entwertungsprozesses nicht erläutert wird. Nur einzelne Teilnehmende sprechen von einer Übertragung von Energie an die Umgebung.

Die phänomenologischen Auswirkungen der Energieentwertung auf den periodischen Vorgang werden in beiden Gruppen nur von wenigen Teilnehmenden beschrieben.

Während bei den nicht-periodischen Prozessen mit klar definiertem Ende bei der Gruppe LoIR eine Kontextabhängigkeit des Verständnisses für Energieentwertung festgestellt werden kann (vgl. Kapitel 7.3.2.2), ist bei Gruppe tE unabhängig vom Kontext kein tiefergehendes Verständnis für Energieentwertung erkennbar. Dies äußert sich zum einen darin, dass insgesamt nur wenige Teilnehmende von Energieentwertung sprechen. Dabei erläutern diese Teilnehmenden, dass eine Energieentwertung am Ende des Prozesses stattfindet, der Entwertungsvorgang wird jedoch nicht näher erläutert. Zum anderen äußert eine Vielzahl der Teilnehmenden eine Unsicherheit bei der Zuordnung einer Energieform nach Ende des Prozesses, die durch das Fehlen eines offensichtlichen Indikators verursacht zu sein scheint. Dies korrespondiert mit den Beobachtungen von Daane et al. (2015), die ebenfalls Schwierigkeiten bei der Zuordnung der inneren Energie durch das Fehlen des beobachtbaren Indikators der Temperaturerhöhung feststellten. Eine solche Unsicherheit ist bei einzelnen Teilnehmenden der Gruppe LoIR ebenfalls erkennbar, jedoch weniger ausgeprägt.

Das Szenario des motorisierten Pendels, welches ein erhöhtes Anforderungsniveau aufweist, bringen in beiden Gruppen nur wenige Teilnehmende mit Energieentwertung in Verbindung. In der traditionellen Energieunterrichtsgruppe äußern ein Drittel der Teilnehmenden explizit, dass hier keine Entwertung stattfindet.

Bezüglich der Energieerhaltung äußern sich insgesamt mehr Teilnehmende der Gruppe tE zum Mengenerhalt der Energie. Jedoch bleiben in beiden Gruppen die Aussagen auf einer allgemeinen Ebene in der Form „Die Energiemenge bleibt immer gleich“ oder „Energie kann nur umgewandelt werden“ und nehmen keinen Bezug auf die konkreten Szenarien (vgl. Anhang D.1.2, S.288). Obwohl sowohl der Stein als auch das Pendel in beiden Lehrgängen explizit im Unterricht thematisiert wurden, konnten bei diesen Szenarien in beiden Gruppen vermehrt Aussagen zum Energieverbrauch identifiziert werden.

8.4.3.2 Gruppenvergleich: Verständnis hinsichtlich Entwertung und Erhaltung im Lehrgang mit eingebetteter IR-Kamera gegenüber der Lehrgangsguppe ohne IR-Kamera (Forschungsfrage 4)

Forschungsfrage 4: Inwiefern

- a) *gelingt durch die „**mediendidaktische Einbettung**“ der IR-Kamera in den entwickelten Lehrgang eine Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung **gegenüber der Lehrgangsguppe** ohne Einsatz der IR-Kamera?*
- b) *gelingt durch diese **mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera** in den Lehrgang eine Anbahnung des Verständnisses für Energieerhaltung **gegenüber der Lehrgangsguppe** ohne Einsatz der IR-Kamera?*

Bei der Datenanalyse werden einerseits die Daten des **Energietests** und andererseits die **Interviewdaten** herangezogen (vgl. Kapitel 6.2). Obwohl mittels der Erhebungsinstrumente ebenfalls Daten zu den Aspekten *Formen* sowie *Umwandlung und Transfer* erhoben wurden, wird gemäß dem Forschungsinteresse im Folgenden von den Ergebnissen der Aspekte *Entwertung* und *Erhaltung* ausführlicher berichtet (Forschungsfrage 4, vgl. Abbildung 51, roter Kasten).

Ergebnisse des Energietests für die Aspekte der Energiequadriga zu den Zeitpunkten T0 und T2

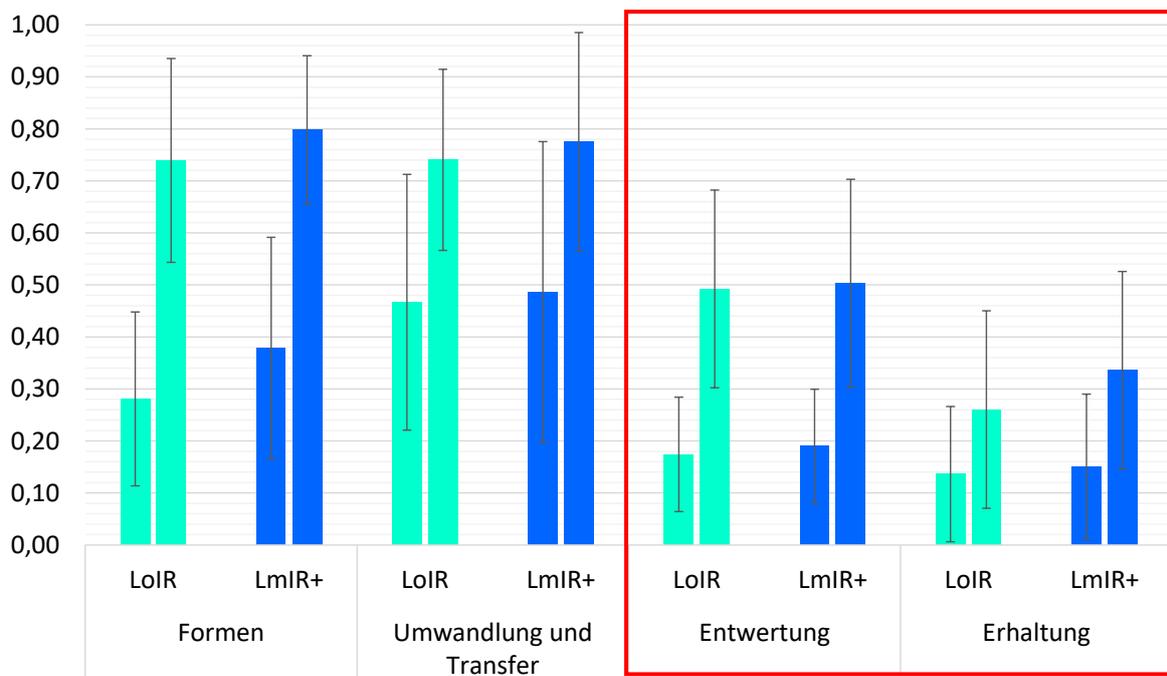
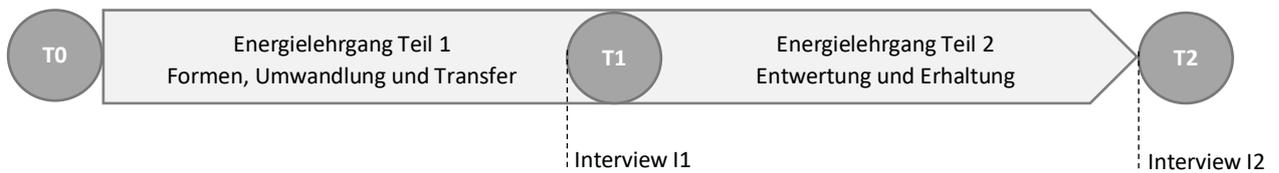


Abbildung 51: Balkendiagramm der Ergebnisse des Energietests für die Gruppen LoIR und LmIR+; aufgetragen wurden die Skalenmittelwerte in Prozent.

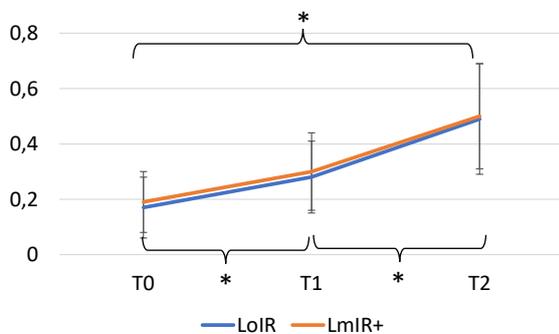
Zusammenfassend liegt in beiden Gruppen beim Pretest zum Zeitpunkt T0 ein niedriges Verständnis der Aspekte *Formen* sowie *Umwandlung und Transfer* vor, welches zum Zeitpunkt T2 eine signifikante Steigerung mit einem großen Effekt aufweist. Dieses Ergebnis zeigt, dass in beiden Gruppen gleichermaßen eine Verständnisenwicklung hinsichtlich der Aspekte *Formen* sowie *Umwandlung und Transfer* stattgefunden hat (vgl. Abbildung 51).

Energietest

Die Ergebnisse des Energietests wurden über die drei Testzeitpunkte von Pretest (T0), Whiletest (T1) und Posttest (T2) analysiert; hierbei ist in beiden Gruppen ein signifikanter Zuwachs beim Aspekt Entwertung von T0 zu T1, T1 zu T2 sowie von T0 zu T2 festzustellen (vgl. Abbildung 52). Bezüglich Energieerhaltung ist dieser Zuwachs in beiden Gruppen von T0 zu T2 zu beobachten, in der Gruppe LmIR+ ebenfalls von T1 zu T2.



Entwertung Testzeitpunkte T0, T1 und T2



Erhaltung Testzeitpunkte T0, T1 und T2

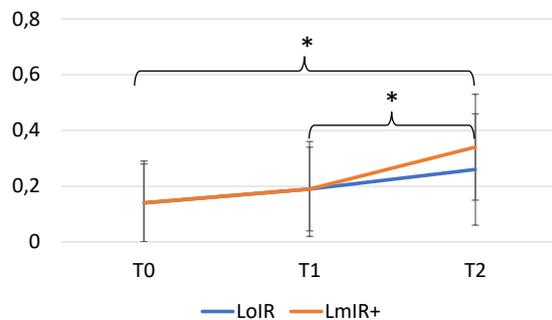


Abbildung 52: Vergleich der Testzeitpunkte T0, T1 und T2 auf Grundlage der Energietestdaten der Aspekte Entwertung und Erhaltung für die Gruppen LoIR und LmIR+, Skala in Prozent.

Im Rahmen der Untersuchung der Daten auf Gruppenunterschiede bei den Aspekten Energieentwertung und Energieerhaltung sind erwartungskonform sowohl im Pretest als auch im Whiletest keine Gruppenunterschiede festzustellen, da hier im Lehrgang noch keine explizite Thematisierung der Aspekte stattfand. Während im Posttest beim Aspekt Entwertung kein signifikanter Gruppenunterschied festzustellen ist, zeigt sich ein Unterschied im Verständnis für Energieerhaltung: Gruppe LmIR+ erreicht eine signifikant höheres Verständnis von

Energieerhaltung als die Gruppe LoIR ($z = -2.55$, $p = .011$, $w = .20$, $1-\beta = .73$, vgl. Abbildung 53 und Anhang D.2).

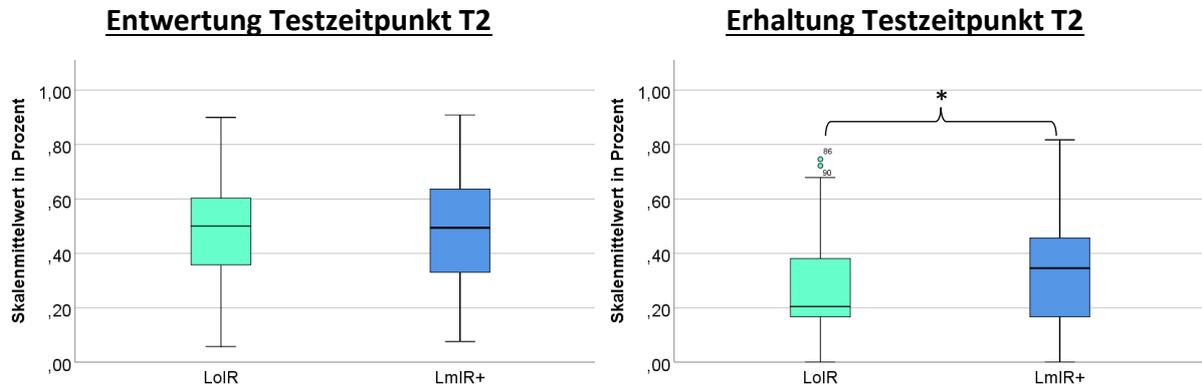


Abbildung 53: Gruppenvergleich der Aspekte Entwertung und Erhaltung auf Grundlage der Energietestdaten zum Zeitpunkt T2.

Interview

1. Quantitative Analyse

Aus schulorganisatorischen Gründen konnte in der Gruppe LmIR+ keine Erhebung zum Testzeitpunkt T1 stattfinden. Das Fehlen der Daten zum Testzeitpunkt T1 lässt somit keine Aussage über die Zunahme im Verständnis für Entwertung und Erhaltung in dieser Gruppe zu. Daher erfolgt ausschließlich ein Vergleich der Gruppen zum Testzeitpunkt T2.

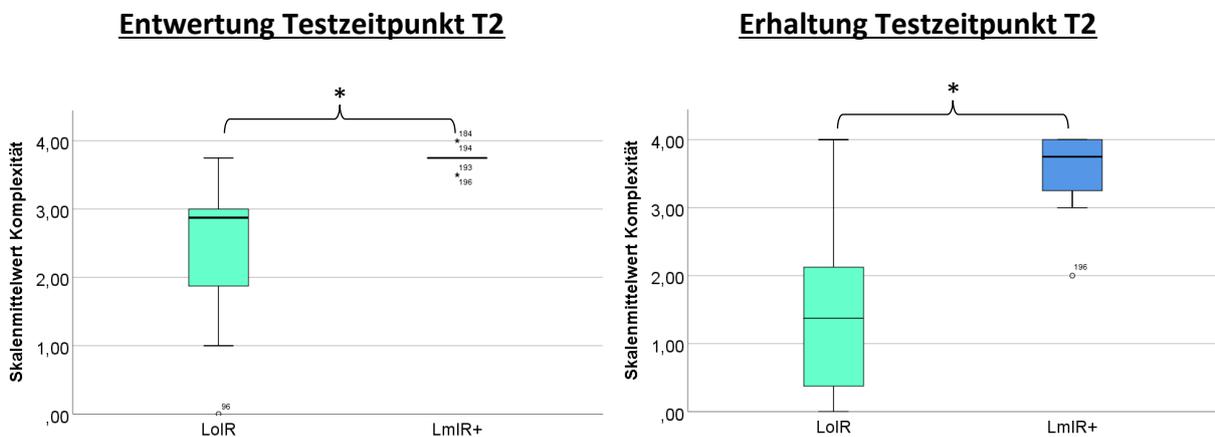


Abbildung 54: Gruppenvergleich der Aspekte Entwertung und Erhaltung auf Grundlage der Interviewdaten zum Zeitpunkt T2.

Die Analyse ergibt für die Aspekte Entwertung und Energieerhaltung zum Testzeitpunkt T2 einen signifikanten Gruppenunterschied (vgl. Abbildung 54): Die Gruppe LmIR+ erreicht im Interview bei diesen Aspekten eine signifikant höhere Komplexität im Verständnis als die Gruppe LoIR mit einem großen Effekt (Entwertung: $z = -3.11$, $p = .001$, $w = .75$, $1-\beta = .94$ Erhaltung: $z = -2.67$, $p = .006$, $w = .65$, $1-\beta = .96$), wobei die Teilnehmenden keine signifikanten

Unterschiede hinsichtlich der Lernendenvariablen *kognitive Fähigkeit* bzw. *Interesse* aufweisen.

Während die Gruppe LmIR+ bei beiden Aspekten eine mittlere Komplexität im Bereich *Zusammenhänge* bis *Konzept* erreichte, liegt bei der Gruppe LoIR hinsichtlich Entwertung eine mittlere Komplexität im Bereich *Zusammenhänge* und für Erhaltung im Bereich *Fakten* bis *Zuordnung* vor.

2. Qualitative Analyse

Aufgrund der im Rahmen der quantitativen Analyse festgestellten Gruppenunterschiede im Verständnis der Aspekte Entwertung und Erhaltung, werden die Interviewtranskripte hinsichtlich dieser Unterschiede qualitativ nach dem in Kapitel 6.2.2 dargestellten Verfahren ausgewertet. Die

#P = Anzahl der Personen
dAG = durchschnittlicher Ausprägungsgrad
fettgedruckt = $\#P \geq \frac{N}{2}$
graue Markierung: In beiden Gruppen identifizierte Aussage.
eingerrückte Zeilen: Aussage ist in Verbindung mit der Aussage darüber zu sehen.

in den Untersuchungsgruppen *Lehrgang ohne IR-Kamera (LoIR)* und *Lehrgang mit IR-Kamera+ (LmIR+)* identifizierten Aussagen werden gegenübergestellt und sowohl die Anzahl der Teilnehmenden als auch der durchschnittliche Ausprägungsgrad dieser Aussage angegeben.

Es erfolgt auch hier eine Zuordnung der interviewten Schülerinnen und Schüler in Abhängigkeit ihrer Leistungsstärke nach Einschätzung der Physiklehrkraft zu den Kategorien leistungsstark, mittelmäßig und leistungsschwach, die im Code mittels Sternchen gekennzeichnet wird (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Zuordnung der Teilnehmenden zu den Kategorien leistungsstark, mittelmäßig und leistungsschwach.

Vergleichsgruppe	eingeschätzt als leistungsstark***	eingeschätzt als mittelmäßig**	eingeschätzt als leistungsschwach*
LoIR	LoIR_A*** LoIR_G***	LoIR_D** LoIR_E** LoIR_H**	LoIR_B* LoIR_C* LoIR_F*
LmIR+	LmIR+_A*** LmIR+_H***	LmIR+_B** LmIR+_E** LmIR+_F** LmIR+_I**	LmIR+_C* LmIR+_D* LmIR+_G*

Entwertung

Im Folgenden wird deutlich, dass sich der in der quantitativen Analyse beobachtbare Gruppenunterschied zum einen durch Unterschiede in der zugeordneten Teilnehmendenzahl sowie im durchschnittlichen Ausprägungsgrad der Aussagen manifestiert.

Zum anderen ergeben sich insbesondere in den Äußerungen über die phänomenologischen Auswirkungen der Energieentwertung in der Bezugnahme auf das konkrete Szenario Gruppenunterschiede. Während die Gruppe LmIR+ vermehrt auf die Folgen der Entwertung im Zusammenhang mit dem jeweiligen Vorgang eingeht, erklären dies nur wenige Teilnehmende der Gruppe LoIR. Zudem ist in der Gruppe LoIR eine Kontextabhängigkeit der Aussagen zur Entwertung feststellbar (vgl. Kapitel 7.3.2.2).

Begriffsverständnis

Während bei der Gruppe LoIR bei zwei Teilnehmenden unabhängig vom jeweiligen Kontext die Aussage „Energieentwertung meint, dass eine Energieform verschwindet“ zum Begriff der Entwertung festgestellt wurde (vgl. Kapitel 7.3.2.2), können bei der Gruppe LmIR+ nur Aussagen zum Begriffsverständnis beobachtet werden, die als anknüpfungsfähig kategorisiert wurden.

Aufgabe 1: Skater auf der Halfpipe

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren. Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

Es fällt auf, dass bei diesem Szenario in den Untersuchungsgruppen LoIR und LmIR+ im Zusammenhang mit Entwertung überwiegend identische Aussagen exzerpiert wurde, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden können (graue Markierung, vgl. Tabelle 29). Gruppenunterschiede ergeben sich jedoch in der Teilnehmendenzahl sowie im durchschnittlichen Ausprägungsgrad. Während in der Gruppe LmIR+ nahezu alle Teilnehmenden die Umwandlung von Energie in innere Energie, die Übertragung von Energie in die Umgebung sowie eine Zunahme der Menge an innerer Energie im Laufe des Skatens mit erhöhtem durchschnittlichen Ausprägungsgrad beschreiben, äußern dies nur bei der Hälfte der Teilnehmenden der Gruppe LoIR mit einem niedrigeren durchschnittlichen Ausprägungsgrad.

Auch im Hinblick auf die phänomenologischen Auswirkungen der Entwertung unter Bezugnahme zum konkreten Szenario können Gruppenunterschiede festgestellt werden: In der Gruppe LmIR+ begründen insgesamt fünf Teilnehmende die zuvor beschriebene Abnahme der Pendelamplitude des Skaters durch die Übertragung von Energie in die Umgebung:

LmIR+_D*: „Und es wird halt immer ein Teil der [...] inneren Energie, die durch die Reibung entsteht, an die Umgebung abgegeben. Und diese Energie fehlt dem Skater halt am Ende, wenn er wieder nach oben möchte, geht das halt nicht, weil er zu viel Energie verloren hat.“

Dies wird in der Gruppe LoIR nur von einzelnen Teilnehmenden aus dem oberen Leistungsspektrum beschrieben.

Weiterhin lassen sich in der Gruppe LmIR+ eine Reihe von Aussagen exzerpieren, die auf ein differenziertes Verständnis für Energieentwertung hindeuten. Beispielsweise äußern sich zwei Drittel der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ zum Weitertransport von Energie in der Umgebung, davon ziehen zwei Teilnehmende zur Erklärung das Teilchenmodell heran:

LmIR+_G*: „Die verteilt sich. Also die gleicht sich erst der Umgebung an, da spielt ja auch jetzt das Teilchenmodell eine Rolle, da versucht, also werden die Teilchen mit den anderen Teilchen in Kontakt kommen und die versuchen halt ... die werden, gleichen sich sozusagen an. Kalt und warm wird ungefähr so gleich... gleich schnell und dadurch und dann gleicht sich das erst und dann verteilt sich das in der Luft und dann ist es sozusagen.“

Obwohl der Vorgang des Skatens als Realprozess betrachtet wird, geht ein Drittel der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ im Rahmen ihrer Erläuterungen zur Entwertung selbstständig auf einen idealisierten, reibungsfreien Vorgang ein:

LmIR+_A***: „Weil die Energie nicht verloren gehen kann und nur durch die Reibung verloren geht. Das heißt, wenn es keine Reibung geben würde, würde der unten wieder hochkommen und dann würde er wieder hochkommen.“

Zwei Teilnehmende ziehen bei ihren Erläuterungen zur Argumentation die IR-Kamera heran:

LmIR+_H***: „Angenommen, wenn man das mit einer Infrarotkamera filmen würde, die Halfpipe, dann würde man eine rote Spur sehen für Temperaturerhöhung und deswegen halte ich daran fest, dass da dann innere Energie vorhanden sein müsste... und... da bei dem Beispiel, weil ich weiß, dass sich da durch Reibung Bewegungsenergie in innere Energie umwandelt.“

Dieser Proband weist den Bildern der IR-Kamera die Bedeutung als Evidenz für die Umwandlung von Energie in innere Energie zu.

Tabelle 29: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 1.

Aufgabe 1: Entwertung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	# P	dAG	#P	dAG
Alltagssprache- brauch/Erfahrungswis- sen	Im Laufe des Prozesses nimmt die Reibung zu.	2	0,13		
	Die Reibung hängt von der Geschwindigkeit ab.			3	0,22
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Die innere Energie kommt zur Energie des Prozesses dazu.	1	0,06		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Situative Betrachtung der inneren Energie.	1	0,06		
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt,	5	0,75	9	0,89
	dadurch wird das Skateboard gebremst.	2	0,13		
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	3	0,25	7	0,61
	Es wird (durch Reibung) Energie in die Umgebung abgegeben,	5	0,56	8	0,94
	dadurch bleibt der Skater irgendwann stehen.	2	0,06	5	0,44
	da sich die Halfpipe und der Skater erwärmen.			1	0,06
	Die Energie verteilt sich in der Umgebung.	2	0,06	6	0,33
	Erklärung im Teilchenmodell, auch energetische Betrachtung.			2	0,11
	Energie kann ihren Nutzen verlieren,	3	0,25	8	0,72
	für den Vorgang.			3	0,22
	Wenn es keine Reibung geben würde, würde die Ausgangshöhe erreicht.			3	0,17
	Durch Zuführen von Energie (aus den Muskeln) wird die Ausgangshöhe wieder erreicht.			1	0,06
Infrarotkamera	Man könnte durch die IR-Kamera eine rote Spur auf der Halfpipe sehen.			1	0,06
	Mit der IR-Kamera könnte man einen roten Fleck sehen, der verblasst.			1	0,06

Aufgabe 2: Der fallende Stein

Du hebst einen Stein hoch und lässt ihn fallen. Was kannst du über die Energie des Steins sagen?

Auch beim fallenden Stein konnten in beiden Gruppen überwiegend identische Aussagen der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden, jedoch liegt die Teilnehmendenzahl sowie der durchschnittliche Ausprägungsgrad der Aussagen in der Gruppe LmIR+ höher als in der Gruppe LoIR (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 2.

Aufgabe 2: Entwertung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
	Keine Vorstellung zum Bewegungsablauf.	1	0,00		
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Luftwiderstand wird der Stein gebremst.	1	0,06		
	Die Luftreibung erwärmt den Stein und die Luft.	2	0,06		
	Durch Reibung gibt es eine Temperaturveränderung.			4	0,22
Von den Unterrichtsinhalten nicht überzeugt	Wir hatten das zwar so im Unterricht, aber ich kann mir nicht vorstellen, dass die (ganze) Energie umgewandelt wird. Sie wird verbraucht.	1	0,25		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Hier gibt es keine innere Energie aufgrund fehlender Reibung.	2	0,13		
	Die abgegebene Energie ist Bewegungsenergie.	1	0,19		
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt,	3	0,38	7	0,61
	da sich die Luft/der Boden erwärmen.			2	0,11
	Energie wird (durch Reibung) in die Umgebung abgegeben,	6	0,69	7	0,61
	dann hat der Stein keine Energie mehr.	2	0,19		
	Beim Aufprall wird Energie in die Umgebung übertragen,			7	0,61
	dann hat der Stein keine Energie mehr.			3	0,22
	In der Umgebung verteilt sich die Energie.	3	0,19	3	0,22
	Erklärung im Teilchenmodell.			2	0,11
	Energie kann ihren Nutzen verlieren,	3	0,31	6	0,50
	für den Vorgang.			2	0,11
	Im Laufe des Prozesses nimmt die Menge an innerer Energie zu.			2	0,22
	Auf dem Boden gibt es nur noch innere Energie.			3	0,28
Infrarotkamera	Die Umwandlung in innere Energie kann mit der IR-Kamera beobachtet werden.			1	0,17

Darüber hinaus nimmt auch hier ein Großteil der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ bei ihren Erläuterungen zur Energieentwertung Bezug auf die konkrete Situation. Beispielsweise wird eine Energieübertragung vom Stein zum Boden durch den Aufprall beschrieben.

Auch in der Gruppe LoIR wird von einem Großteil der Teilnehmenden eine Energieübertragung beschrieben, allerdings bleiben die Aussagen auf einer allgemeineren Ebene ohne konkreten Bezug zum Szenario.

Insgesamt zeigt sich in Gruppe LmIR+ auch bei diesem Szenario ein differenzierteres Bild der Aussagen als in der Gruppe LoIR, da hier eine größere Anzahl an Aussagen exzerpiert werden konnten, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden können.

Aufgabe 3: Das rutschende Kind

Ein Kind sitzt oben auf einer Rutsche und möchte gleich losrutschen. Was kannst du über die Energie des Kindes sagen?

Beim rutschenden Kind berücksichtigen beide Gruppen bei ihren Erläuterungen die Umwandlung von Energie in innere Energie (vgl. Tabelle 31). Jedoch beschreiben in der Gruppe LoIR nur einzelne Teilnehmende die phänomenologischen Auswirkungen dieser Umwandlung auf den Rutschvorgang.

Hingegen geben mehr als die Hälfte der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ an, dass das Kind aufgrund der Umwandlung von Energie in innere Energie gebremst würde:

LmIR+_B***: „Also man rutscht etwas langsamer... also nicht langsamer, sondern man... also dadurch, dass es in innere Energie umgewandelt wird, wird das Kind ja ein bisschen langsamer sozusagen, weil also es ja nicht mehr so viel Energie hat.“*

In beiden Untersuchungsgruppen wird ein Energietransfer in die Umgebung beschrieben, wobei die durchschnittliche Ausprägung dieser Aussage bei der Gruppe LmIR+ höher liegt als bei der Vergleichsgruppe. Als Folge dieses Transfers ordnen drei Teilnehmende der Gruppe LmIR+ dem Kind weniger Energie zu.

Auch hier gehen ein Drittel der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ selbstständig auf eine Idealisierung des Vorgangs unter Annahme der Reibungsfreiheit ein.

Ein*e Teilnehmende*r gibt an, dass die Umwandlung in innere Energie mit der IR-Kamera „gesehen“ werden könne:

LmIR+_F***: „Mit der Infrarotkamera könnte man das, also die... Wenn halt innere Energie sieht man ja, da das sehr warm ist und ja.“

Tabelle 31: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 3.

Aufgabe 3: Entwertung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachegebrauch/Erfahrungswissen	Situative Betrachtung der inneren Energie.	1	0,06		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Bei diesem Vorgang gibt es keine innere Energie.	1	0,06		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Durch die Reibung hat die Rutsche mehr Energie, wird nicht abgeben.	1	0,06		
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt,	7	0,75	9	0,67
	dadurch wird das Kind bremsst.	1	0,06	5	0,33
	Am Ende der Rutsche gibt es nur noch innere Energie.	2	0,13	2	0,11
	Energie wird (durch Reibung) an die Umgebung abgegeben,	4	0,38	6	0,61
	da sich die Rutsche erwärmt.	1	0,13		
	dadurch hat das Kind nicht mehr so viel Energie.			3	0,17
	Energie kann ihren Nutzen verlieren,	3	0,19	7	0,44
	für das Rutschen.			4	0,28
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	3	0,19	2	0,11
	In der Umgebung verteilt sich die Energie.			3	0,22
Wenn es keine Reibung geben würde, würde das Kind schneller rutschen.			3	0,22	
Infrarotkamera	Die Umwandlung in innere Energie kann mit der IR-Kamera beobachtet werden.			1	0,06

Aufgabe 4a: Das Pendel

Ein Pendel ist an einem Motor befestigt. Du lenkst es aus und lässt es los. Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor ausgeschaltet ist?

Im Zusammenhang mit dem Szenario des Pendels beschreiben über die Hälfte der Teilnehmenden der Gruppe LoIR eine Umwandlung von Energie in innere Energie und erläutern die Energieübertragung in die Umgebung (vgl. Tabelle 32). Jedoch erklärt nur ein*e als mittelmäßig eingeschätzte*r Teilnehmende*r die damit einhergehende Abnahme der Pendelamplitude.

Demgegenüber beschreiben alle Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ die Abnahme der Amplitude als Folge des Energietransfers in die Umgebung mit hohem durchschnittlichem Ausprägungsgrad.

*LmIR+_B**:* „Also die Energie wird, also sowas Ähnliches wie bei der Halfpipe... Zuerst hat es Höhenenergie, danach wird es losgelassen [...], reibt gegen die Luft, hat also auch innere Energie, da die Temperatur verändert wurde. Und je höher es kommt, desto mehr Höhenenergie und weniger Bewegungsenergie hat es. Aber die innere Energie wird immer mehr, dadurch wird das Pendel langsam langsamer, weil die innere Energie ja auch abgegeben wird an die Luft und auch an den ... also oben reibt es sicherlich auch ein bisschen. Und ja dann wird es immer langsamer bis es halt nicht mehr pendelt, weil die Energie dann halt komplett an die Umgebung und an den Motor... also hier abgegeben wurde.“

Vier Teilnehmende dieser Gruppe gehen ebenfalls auf die Abnahme des Nutzwerts der Energie für das Pendeln ein.

In beiden Gruppen äußern sich einzelne Teilnehmende selbstständig zum idealisierten Szenario, indem sie zusätzlich auf die Annahme der Reibungsfreiheit eingehen:

LmIR+_C:* „Also, wenn das Pendel, wenn man das hinkriegen würde, dass das Pendel möglichst wenig Reibung an der Luft entsteht bei dem Vorgang. Dann würde es länger schwingen.“

*LoIR_E**:* „Also ich glaube auch, weil es sich reibt und wenn halt keine Reibung da wäre, dann würde sich die ganze Zeit hin und her schwingen. Aber, wenn... weil die Reibung ja auch Energie entzieht und deswegen kann es halt nicht die ganze Zeit weiter hin und her schwingen.“

Ein*e Teilnehmende*r der Gruppe LmIR+ nimmt konkret Bezug auf die IR-Kamera und beschreibt, dass man durch eine IR-Kamera die Aufhängung des Pendels „rot“ sehen würde, da es dort wärmer sei:

LmIR+_A***: „Man könnte eine Infrarot-Kamera nehmen und das Gewinde angucken. [...] [Man würde] einen roten Punkt [sehen], weil es dunkler also es röter ist, es wärmer ist der Punkt da.“

Tabelle 32: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 4a.

Aufgabe 4a): Entwertung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Die Höhe nimmt aufgrund des fehlenden Schwungs ab.	1	0,13		
	Man würde Wärme spüren, wenn man die Aufhängung berührt.	2	0,19		
	Beim Pendel entsteht Reibung an der Aufhängung.			3	0,17
	Unsicherheit bei der Zuordnung der Energieform zu Prozessende.	1	0,06		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Beim Pendel gibt es keine Energieentwertung.			1	0,06
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Hier gibt es keine innere Energie (aufgrund fehlender Reibung).	2	0,13		
	Situative Betrachtung der inneren Energie.	1	0,06		
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt.	6	0,63	7	0,44
	Die Menge an innerer Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	1	0,06	4	0,28
	Energie wird (durch Reibung) in an die Luft /Aufhängung abgegeben,	5	0,56	9	0,67
	deshalb schwingt das Pendel aus/ nicht mehr so hoch.	1	0,13	9	0,78
	In der Umgebung verteilt sich die Energie.			3	0,22
	Energie kann ihren Nutzen verlieren,			5	0,33
	für das Pendeln.			4	0,28
Wenn es keine Reibung gäbe, dann würde es immer weiter schwingen.	1	0,06	2	0,11	
Infrarotkamera	Das Gewinde wäre durch die IR-Kamera rot dargestellt, weil es wärmer ist.			1	0,06

Aufgabe 4b: Das motorisierte Pendel

Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor eingeschaltet ist?

Bei eingeschaltetem Motor fällt auf, dass in der Gruppe LoIR nur bei einzelnen Teilnehmenden aus dem oberen Teil des Leistungsspektrums Aussagen der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen*

zugeordnet werden konnten (vgl. Tabelle 33). Nur ein Drittel der Teilnehmenden dieser Gruppe beschreibt in diesem Zusammenhang die Umwandlung von Energie in innere Energie.

Tabelle 33: Identifizierte Aussagen zur Entwertung im Rahmen von Aufgabe 4b.

Aufgabe 4b): Entwertung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Motor hat das Pendel überall dieselbe Geschwindigkeit.	1	0,06		
	Man würde Wärme spüren, wenn man die Aufhängung berührt.	1	0,06		
	Hier gibt es keine Reibung.	1	0,06		
Kognitiver Konflikt	Es wird auch mit Motor Energie in die Umgebung abgegeben, aber das Pendel erreicht trotzdem wieder dieselbe Höhe, das verstehe ich nicht.	1	0,13		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Die hinzugefügte Energie wird vom Motor erzeugt und nicht umgewandelt.			1	0,06
	Bei eingeschaltetem Motor wird keine Energie entwertet.			1	0,06
Lehrgangsvorstellungen	Energie wird (durch Reibung) in innere Energie umgewandelt	3	0,19	5	0,44
	und in die Umgebung übertragen.			3	0,22
	Durch den Motor wird die innere Energie ausgeglichen.	1	0,06	5	0,44
	Der Motor regeneriert die Energie, sodass Höhen und Bewegungsenergie wieder eine ganze Säule ergeben.	1	0,13		
	Die Menge der inneren Energie nimmt im Laufe des Prozesses zu.	2	0,13		
	Energie kann ihren Nutzen verlieren.			1	0,11
	Wenn es weniger Reibung geben würde.			2	0,11
	In der Umgebung verteilt sich die Energie.			1	0,06

In der Gruppe LmIR+ beschreiben insgesamt über der Hälfte der Teilnehmenden den Umwandlungsprozess unter Berücksichtigung der inneren Energie und erklären, dass die innere Energie durch den Motor „ausgeglichen“ werde, sodass das Pendel weiterschwingt:

LmIR+_D*: „Und dann wird halt das Pendel nicht stehen bleiben, weil sich... also es wird sich trotzdem immer noch gleich viel Energie in innere Energie umwandeln, aber trotzdem da Energie zum Vorgang dazu gegeben wird, also zum Prozess dazu gegeben wird, wird es halt nicht weniger. Das heißt der Teil, der an die Umgebung abgegeben wird, wird halt durch den Motor wieder reingeschoben.“

Erhaltung

Im Rahmen der quantitativen Analyse konnte beim Aspekt Erhaltung ein Gruppenunterschied zwischen den Gruppen LoIR und LmIR+ festgestellt werden, wobei die Gruppe LmIR+ eine signifikant höhere Komplexität im Verständnis erreichte. In der folgenden qualitativen Analyse wird deutlich, dass sich dieser Unterschied in der Gruppe LmIR+ insbesondere in einer ausgeprägteren Vorstellung zum Mengenerhalt manifestiert. Darüber hinaus beschreiben Teilnehmende dieser Gruppe den Umwandlungsprozess vermehrt unter Verwendung der Begriffe *komplett* oder *vollständig* und nehmen dabei Bezug auf das jeweilige Szenario.

Begriffsverständnis

Fünf Teilnehmende der Gruppe LoIR beschreiben im Zusammenhang mit der Frage nach Energieerhaltung, dass diese nur gelte, wenn eine oder mehrere Energieformen dem System bis zum Ende des Prozesses zugeordnet werden können:

LoIR_D**: „Ja eigentlich ist hier keine, wenn wirkliche Energieerhaltung. Also die Höhenenergie taucht ja auch wieder auf am Ende, aber sie ist nicht durchgehend da, deswegen...“.

Nur bei einer oder einem Teilnehmenden können im weiteren Verlauf des Interviews Aussagen der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden.

Einzelne Teilnehmende äußern im Zusammenhang mit Erhaltung, dass diese nur gelte, wenn der Vorgang endlos weiterlaufen würde oder die gesamte Energie beispielsweise beim Kind bleibe:

LoIR_A***: *Energieerhaltung das ist gibt es eigentlich nicht, weil der Junge rutscht runter und dann verbraucht... gibt er ja die Energie ja komplett an die Umwelt ab.*

Dies deutet auf ein fehlerhaftes Verständnis des Begriffs Energieerhaltung hin.

Vorstellungen zum Energiekontomodell

Um das Energiekontomodell ebenfalls zur Analyse heranziehen zu können, wurden die Teilnehmenden im Rahmen der Interviews darum gebeten die Bedeutung der Karten zu erläutern. Die Gruppe LoIR ordnete daraufhin im Interview zunächst den einzelnen Karten die zugehörige Energieform zu und benannte mitunter einen Indikator dieser Energie:

LoIR_D**: „Also es sind verschiedene Energieinhalt... die blauen... es wird benutzt für die Höhenenergie, die grünen für die Bewegungsenergie und die roten für die innere Energie.“

Auch in der Gruppe LmIR+ findet diese Zuordnung statt, jedoch beschreiben vier Teilnehmende das Modell ebenfalls auf einer Metaebene und stellen bereits einen Zusammenhang zur Energieumwandlung und Energieerhaltung her:

LmIR+_A***: „Die Karten zeigen, je nachdem was sie sind, wie viel von der Energie gerade der Gegenstand besitzt, den man beobachtet.“

LmIR+_D**: „Also man kann mit denen ein Energiekontomodell legen. Und ein Energiekontomodell zeigt halt, welche Energiearten an einem Prozess beteiligt sind. Und die Energiearten, also das wird immer von einer Energie in eine andere umgewandelt, aber es bleibt halt immer gleich viel. Deswegen... also das ist auch immer... also es ist halt so, dass man damit zeigen kann, wie die Energie umgewandelt wird bei einem Prozess.“

Dieses Bewusstsein zeigt sich auch beim Anfertigen der Modelle, da einzelne Teilnehmende bereits beim ersten Snapshot mehr als eine Säule legen und diese als gesamte Energiemenge definieren (vgl. Abbildung 55):

LmIR+_B**: „Weil sozusagen das, es ist ja nicht ein Maß der Energie, es wird ja sozusagen nicht gewertet, sondern das ist ja nur so eine Art Beispiel, also es ist ja nicht genau so viel Energie, sondern es ist ja einfach nur die gesamte Energie, die sozusagen ein Beispiel darstellt.“

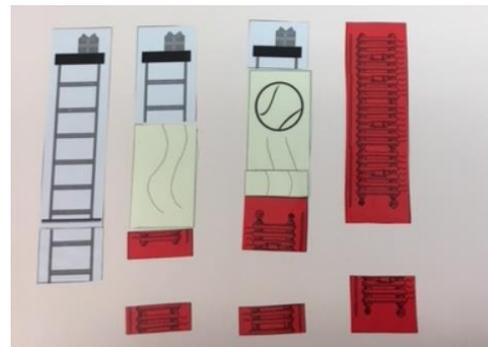


Abbildung 55: Kontomodell von LmIR+_B** zu Aufgabe 3.

Eine Änderung der Säulenhöhe bereits beim ersten Snapshot kann in der Gruppe LoIR nicht beobachtet werden, vielmehr wird das Einhalten der Säulenhöhe eher „regelkonform“ umgesetzt.

Die eigenständige Veränderung des Kontomodells unter Berücksichtigung der Energieerhaltung lässt vermuten, dass in der Gruppe LmIR+ im Zusammenhang mit dem Kontomodell bereits ein tiefgehendes Verständnis für Erhaltung entwickelt wurde.

Aufgabe 1: Der Skater auf der Halfpipe

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren. Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

Insgesamt wurden im Rahmen von Aufgabe 1 in der Gruppe LoIR nur wenige Aussagen identifiziert, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden können (vgl. Tabelle 34). Eine Vielzahl der Teilnehmenden äußert sich zum Einhalten der Säulenhöhe im Energiekontomodell, stellten dabei jedoch keinen Bezug zur Energieerhaltung her. Drei Teilnehmende aus dem oberen Leistungsspektrum dieser Gruppe äußern sich zwar konkret zum Mengenerhalt, jedoch bleiben die Äußerungen eher auf einer allgemeineren Ebene ohne Bezug zum Szenario:

LoIR_H***: *„Die Menge der Energie an sich bleibt gleich eigentlich. Bloß halt nicht mehr in der Form wie vorher.“*

Demgegenüber beschreiben nahezu alle Teilnehmenden der Gruppe LmIR+, dass die Energiemenge immer gleichbleibe. Über die Hälfte erklärt, dass beim Skaten die Energie *komplett* in innere Energie umgewandelt werde und nimmt damit Bezug auf die Energiemenge in der konkreten Situation. Ein Drittel geht explizit darauf ein, dass die Menge der inneren Energie am Ende des Prozesses genauso groß sei wie die Anfangsmenge an Energie:

LmIR+_G*: *„Ich glaube man hat so viel innere Energie wie man vorher, also Höhenenergie, also ich glaube so viel Energie wie man später hat. Also wie man es erst hat. Man hat erst ja eine komplette Energie, eine Energie, die vorhanden ist, also ein Balken jetzt in dem Falle und dann würde, glaube ich, zum Schluss auch ein ganzer Balken innere Energie sein.“*

Im Gegensatz zur Gruppe LoIR können in der Gruppe LmIR+ im Zusammenhang mit dem Szenario des Skaters keine Aussagen zum Energieverbrauch beobachtet werden.

Tabelle 34: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 1 im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 1: Erhaltung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachgebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Schwung erreicht er wieder die ganze Höhe.	1	0,06		
	Durch Schwungholen würde wieder die ganze Höhe erreicht.			4	0,17
	Es muss eine Säule ergeben, weil es im Unterricht auch so war. Es gibt dafür keinen energetischen Grund.	2	0,06		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Energie wird verbraucht.	2	0,19		
	Der Skater erreicht wieder die Ausgangshöhe.			3	0,11
anknüpfungsfähige Vorstellungen	Es muss immer eine ganze Säule ergeben.	4	0,38	7	0,50
Lehrgangsvorstellungen	Die Energiemenge bleibt gleich.	3	0,31	8	0,67
	Die Menge an innerer Energie am Ende ist so groß wie die Menge an Energie am Anfang.			3	0,17
	Am Ende des Vorgangs wird die Energie komplett in die Umgebung abgegeben.	1	0,06		
	Die Energie wird komplett in innere Energie umgewandelt.			5	0,44
	In der Umgebung bleibt die Energie erhalten.			1	0,06
	Die Energie geht nicht verloren.			3	0,28

Aufgabe 2: Der fallende Stein

Du hebst einen Stein hoch und lässt ihn fallen. Was kannst du über die Energie des Steins sagen?

In der Gruppe LoIR wurden beim fallenden Stein nur wenige Aussagen identifiziert, die dem Konzept der Energieerhaltung zugeordnet werden können (vgl. Tabelle 35). Dabei können die exzerpierten Aussagen jeweils nur einzelnen Teilnehmenden zugeordnet werden.

Bei der Gruppe LmIR+ ergibt sich demgegenüber ein einheitlicheres Bild: Nahezu alle Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ äußern mit erhöhtem durchschnittlichen Ausprägungsgrad, dass die Energiemenge immer gleichbleibe; die Hälfte der Teilnehmenden beschreibt dies auch unter Berücksichtigung des Energietransfers in die Umgebung:

LmIR+_B**: „Also irgendwie genauso wie bei dem anderen wird die Energie halt an die Umgebung abgegeben und sie bleibt erhalten sozusagen im Ganzen, nur an anderen Orten halt sozusagen.“

Ein Drittel der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ beschreibt beim Stein einen vollständigen Umwandlungsprozess von Höhenenergie in innere Energie und vergleicht dabei explizit die Menge an innerer Energie mit der Anfangsmenge der Energie.

Insgesamt fällt auf, dass sich bei diesem Szenario in beiden Gruppen keiner*keinem Teilnehmenden zum Energieverbrauch äußert.

Tabelle 35: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 2 im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 2: Erhaltung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Die Menge der Gesamtenergie ändert sich im Laufe des Prozesses.	1	0,06		
Kognitiver Konflikt zu den Unterrichtsinhalten	Wir hatten das zwar im Unterricht , aber ich kann mir nicht vorstellen , dass die (ganze) Energie umgewandelt wird, sie wird verbraucht.	1	0,06		
anknüpfungsfähige Vorstellungen	Die Energie bleibt nicht erhalten, weil am Ende des Prozesses die Energie des Steins an die Umgebung abgegeben wurde.	1	0,06		
	Nach dem Aufprall muss dem Stein weiterhin eine unbekannte Energieform zugeordnet werden.	1	0,06		
	Die Säulen müssen gleich groß sein.			4	0,33
Lehrgangsvorstellungen	Am Ende des Vorgangs wird die Energie komplett in die Umgebung abgegeben.	2	0,06	4	0,39
	Die Energiemenge bleibt gleich,			7	0,56
	sie wurde nur in die Umgebung abgegeben.			4	0,22
	Die Menge an innerer Energie ist so groß wie die Anfangsmenge an Energie.			3	0,17
	Dem Stein wird durch das Hochheben Energie zugeführt.			2	0,17

Aufgabe 3: Das rutschende Kind

Ein Kind sitzt oben auf einer Rutsche und möchte gleich losrutschen. Was kannst du über die Energie des Kindes sagen?

Auch beim rutschenden Kind lassen sich in der Gruppe LoIR wenige Aussagen dem Aspekt der Energieerhaltung zuordnen (vgl. Tabelle 36). Insbesondere konnte einem Drittel der Teilnehmenden die nicht anknüpfungsfähige Vorstellung des Energieverbrauchs zugeordnet werden, wobei nur bei einer*einem leistungsstarken Teilnehmenden im weiteren Verlauf des Interviews ebenfalls eine anknüpfungsfähige Vorstellung zur Erhaltung identifiziert wurde.

Tabelle 36: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 3 im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 3: Erhaltung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Energie wird verbraucht.	3	0,31		
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Die Energie muss immer eine ganze Säule ergeben.	2	0,19	2	0,11
	Energie bleibt die ganze Zeit erhalten, sie wird nur umgewandelt.	3	0,25		
Lehrgangsvorstellungen	Am Ende des Vorgangs wird die Energie komplett an die Umgebung gegeben.	1	0,06		
	Die gesamte Energie wurde in innere Energie umgewandelt.	2	0,13	5	0,33
	Die Energiemenge bleibt gleich,			8	0,67
	die Energie ist nur in der Umgebung.			3	0,17
	Die Menge an innerer Energie ist so groß wie die Anfangsmenge an Energie.			2	0,11

Aussagen zum Mengenerhalt, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden können, wurden insgesamt ausschließlich bei Teilnehmenden identifiziert, die als leistungsstark eingeschätzt wurden.

Demgegenüber äußern sich in der Gruppe LmIR+ nahezu alle Teilnehmenden allgemein zum Mengenerhalt der Energie, über die Hälfte berücksichtigt diesen konkret bei der Beschreibung des Umwandlungsprozesses beim vorliegenden Szenario:

LmIR+_B**:
*„Also am Anfang der Rutsche hat er auf jeden Fall Höhenenergie und wenn er dann halt losrutscht, wird ein Teil dieser Höhenenergie in Bewegungsenergie umgewandelt. [...] also während der Fahrt entsteht natürlich auch Reibung, also innere Energie. [...] und wenn er dann halt angekommen ist [...], dann ist alles **komplett** in innere Energie umgewandelt worden.“*

Herauszustellen ist, dass sich keiner der Teilnehmenden dieser Gruppe zum Energieverbrauch äußert.

Aufgabe 4a: Das Pendel

Ein Pendel ist an einem Motor befestigt. Du lenkst es aus und lässt es los. Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor ausgeschaltet ist?

Auch bei diesem Szenario können in der Gruppe LmIR+ bei nahezu allen Teilnehmenden allgemeine Aussagen zum Mengenerhalt identifiziert werden, wobei über die Hälfte der Teilnehmenden ebenfalls einen Bezug zum konkreten Szenario herstellt (vgl. Tabelle 37):

LmIR+_G*: „Da sich ja wieder die **komplette** Energie, die **sie hatte am Anfang**, in innere Energie umgewandelt hat und die sich wieder an die Umgebung, sich der Umgebung angeglichen hat und dann sich verteilt hat. Und dann ist sie nicht mehr nutzbar.“

Insgesamt konnten in dieser Gruppe ausschließlich Aussagen identifiziert werden, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden konnten.

Tabelle 37: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 4a im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 4a): Erhaltung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Naive Vorstellung zum Begriff Erhaltung	Energieerhaltung meint, eine Energieform kann dem Vorgang bis zum Ende des Prozesses zugeordnet werden.	1	0,13		
	Energieerhaltung meint, dass das Pendel immer weiter schwingt.	1	0,06		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Energie wird verbraucht.	2	0,25		
Lehrgangsvorstellungen	Es muss immer eine ganze Säule ergeben.			1	0,06
	Energie bleibt die ganze Zeit erhalten, sie wird nur umgewandelt,	5	0,31	7	0,39
	die Energie ist nur in der Umgebung.			2	0,11
	Die Energie wird komplett (in innere Energie) umgewandelt/an die Umgebung abgegeben.			5	0,33
	Durch Energietransfer in das System würde die Ausgangshöhe wieder erreicht.			1	0,06
	In der Umgebung bleibt die Energie erhalten.			2	0,11

Auch in der Gruppe LoIR lassen sich beim Pendeln erstmals vermehrt allgemeine Aussagen zum Mengenerhalt exzerpieren, jedoch stellt keiner der Teilnehmenden einen Bezug zum konkreten Szenario her. Bei zwei als leistungsschwach eingeschätzten Teilnehmenden dieser Gruppe wurden ebenfalls Vorstellungen zum Energieverbrauch identifiziert.

Aufgabe 4b: Das motorisierte Pendel

Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor eingeschaltet ist?

Während bei der Gruppe LoIR mehr als die Hälfte der Teilnehmenden äußert, dass das Pendel aufgrund des Motors nicht aufhöre zu schwingen und damit auf einer alltagssprachlichen Ebene bleibt, beschreiben die Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ das Szenario überwiegend aus energetischer Sicht. Dabei geben alle Teilnehmenden dieser Gruppe mit hohem durchschnittlichem Ausprägungsgrad an, dass der Motor Energie hinzufüge:

LmIR+_I*: „Also, ich denke, solange der Motor läuft dann wird dieses Pendel auch immer weiter sich bewegen. Also weil es durch den Motor neue, also mehr Energie, also neue Energie bekommt, neue Bewegungsenergie, mit der es wieder an Höhenenergie zunehmen kann und dadurch wieder mehr kriegt“

Eine Vielzahl dieser Teilnehmenden beschreibt als Folge des Energietransfers mit hohem durchschnittlichem Ausprägungsgrad, dass das Pendel dadurch immer weiter schwinde:

LmIR+_D**: Wenn der Motor eingeschaltet wird, wird das Pendel wahrscheinlich sich weiterdrehen können, weil stetig Energie dazugegeben wird.

Tabelle 38: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 4b im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 4b): Erhaltung		LoIR		LmIR+	
Kategorie	Aussage	#P	dAG	#P	dAG
Alltagssprachegebrauch/ Erfahrungswissen	Durch den Motor hört das Pendel nicht auf zu schwingen,	5	0,50	1	0,06
	durch den Strom.	2	0,13		
	Durch die Erwärmung geht der Motor kaputt.	1	0,06		
Kognitiver Konflikt	Wenn die innere Energie berücksichtigt wird, dann gibt es mehr als eine Säule, das darf nicht sein.	1	0,13		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Energie wird verbraucht.	3	0,19	1	0,06
	Durch den Motor hat das Pendel überall dieselbe Geschwindigkeit.	1	0,06		
	Die Säulenhöhe müsste trotzdem gleich sein.			1	0,06
Anknüpfungsfähige Vorstellungen	Der Motor erhält die Energie.	3	0,19		
	Die Energie bleibt erhalten.	3	0,19		
	Die Energiemenge bleibt gleich.			4	0,39
Lehrgangsvorstellungen	elektrische Energie wird in Bewegungs- und Höhenenergie umgewandelt.			5	0,33
	Die durch den Motor hinzugefügte Energie gleich genau die Menge an entwerteter Energie aus.			5	0,44
	Der Motor fügt Energie hinzu,	2	0,19	9	0,78
	dadurch pendelt es weiter			7	0,61

Über die Hälfte der Teilnehmenden dieser Gruppe geht darüber hinaus darauf ein, dass trotz der Energieentwertung der Pendelvorgang nicht ende und erläutert in diesem Zusammenhang, dass der Motor genau die Menge an entwerteter Energie „ausgleichen“ würde:

LmIR+_C** : „[...] Weil immer noch Energie hinzugefügt wird und auch wenn Energie entwertet wird, kommt ja... dann bleiben diese Säulen ja sozusagen gleich. [Es wird] ungefähr so viel [Energie hinzugefügt], wie innere Energie entwertet wird.“

Diese Zunahme der Energiemenge stellen zwei Teilnehmende passend zu ihrer Erläuterung ebenfalls im Energiekontomodell dar (vgl. Abbildung 56). Dabei unterscheiden sich die Darstellungen dahingehend, dass LmIR+_C* die Energiezufuhr während des gesamten Prozesses berücksichtigt, während LmIR+_H*** den Transfer in das System *Pendel* nur beim letzten Schritt betrachtet. Dieser legt beim letzten Snapshot mit den Karten mehr als eine ganze Energiesäule.

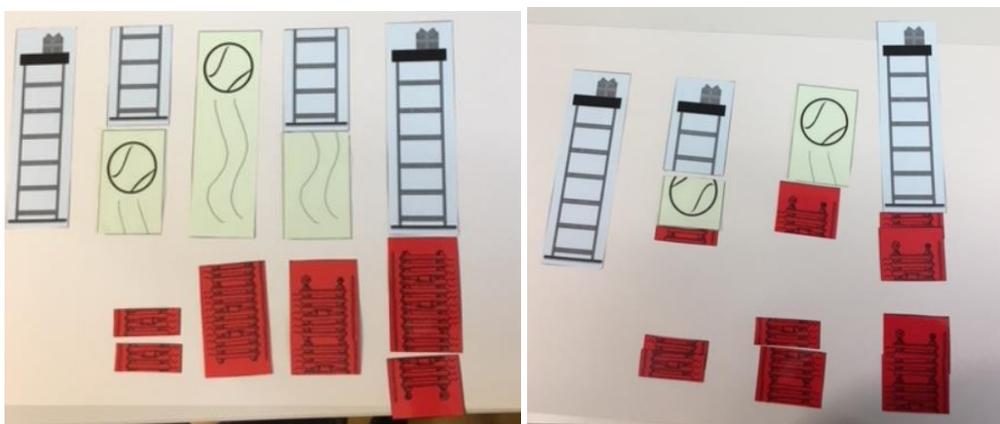


Abbildung 56: Kontomodelle der Teilnehmenden LmIR+_C* (links) und LmIR+_H*** (rechts) im Zusammenhang mit Aufgabe 4b.

Auch in der Gruppe LoIR äußern sich Teilnehmende zur Energieerhaltung. Diese beschreiben, dass die Energiemenge immer gleich bzw. die Energie erhalten bleibe, jedoch trifft dies auf dieses Szenario nur bedingt zu. Durch den Motor findet ein Energietransfer in das System statt, wodurch in diesem Fall die Energiemenge größer wird. Dadurch werden Aussagen zum Mengenerhalt in diesem Zusammenhang der Kategorie *anknüpfungsfähige Vorstellungen* zugeordnet. Den Energietransfer in das System beschreiben in der Gruppe LoIR lediglich zwei als leistungsstark eingeschätzte Teilnehmende, wobei nur eine*r diesen im Energiekontomodell berücksichtigt.

Exkurs

Auf die Frage nach einem Alltagsbeispiel, bei dem es zu einer Abnahme der Energiemenge komme, erläutert ein*e Teilnehmende*r das Abkühlen von Badewasser aus energetischer Sicht:

LmIR+_E**: *„Also oder wenn man badet, ist ein besseres Beispiel. Zum Beispiel, man badet halt, das Wasser ist warm, aber im Laufe der Zeit wird halt ein Teil auch an die Umgebung abgegeben. Z. B., was weiß ich, an den Spiegel oder an den Schrank oder so. Und dann wird das Wasser halt immer, immer etwas kälter und das, ja also die innere Energie, die im Wasser war, wird halt an die Umgebung abgegeben.*

Interviewer: *Ach so. Aber dann ist sie ja dann nicht weg, ne?*

LmIR+_E**: *Nee, sie ist nicht weg. Sondern, aber es kommt einem so vor, als wäre die weg halt.“*

LmIR+_E** erklärt den Energieentwertungsprozess sowie den Mengenerhalt in einem selbst gewählten Alltagskontext, der im Unterricht nicht thematisiert wurde.

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Aspekt Entwertung wurden überwiegend Aussagen identifiziert, die in beiden Gruppen exzerpiert wurden. Diese identischen Aussagen konnten in der Regel der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden.

Im Zusammenhang mit den periodischen Prozessen der Aufgaben 1 und 4a beschreiben beide Gruppen die Umwandlung von Energie in innere Energie sowie einen Energietransfer in die Umgebung. Unterschiede ergeben sich zum einen durch einen höheren durchschnittlichen Ausprägungsgrad sowie zum anderen durch die Bezugnahme auf die konkrete Situation. Während die Mehrheit der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ die Abnahme der Amplituden mit hoher durchschnittlicher Ausprägung durch den Energietransfer in die Umgebung sowie die Abnahme des Nutzwertes der Energie für den Vorgang begründet, stellen aus der Gruppe LoIR nur einzelne Teilnehmende einen solchen Zusammenhang her. Darüber hinaus gehen die Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ vermehrt auf den Weitertransport der Energie in der Umgebung ein.

Bei den nicht-periodischen Szenarien mit klar definiertem Ende ergibt sich in der Gruppe LoIR eine wahrnehmbare Kontextabhängigkeit (vgl. Kapitel 7.3.2.2), die in der Gruppe LmIR+ nicht erkennbar ist. Nahezu alle Teilnehmenden dieser Gruppe beschreiben mit hohem durchschnittlichem Ausprägungsgrad bei beiden Szenarien einen Umwandlungsprozess unter Berücksichtigung der inneren Energie aufgrund von Reibungsvorgängen und gehen auf einen Energietransfer in die Umgebung ein. Dabei nimmt eine Vielzahl der Teilnehmenden dieser Gruppe beim rutschenden Kind ebenfalls Bezug auf die phänomenologischen Auswirkungen

der Entwertung für den Umwandlungsprozess und beschreibt, dass das Kind aufgrund des Energietransfers gebremst werde.

Während nur wenige Teilnehmende der Gruppe LoIR das motorisierte Pendel mit Energieentwertung in Verbindung bringen, beschreibt die Mehrheit der Teilnehmenden der Gruppe LmIR+ einen Umwandlungsprozess, der Energieentwertung berücksichtigt. Darüber hinaus erklärt über die Hälfte der Teilnehmenden, dass der Motor die entwertete Energie „ausgleiche“. Insgesamt ergibt sich in der Gruppe LmIR+ durch die exzerpierten Aussagen das Bild eines differenzierteren Verständnisses für Energieentwertung, da bei einem Drittel der Teilnehmenden dieser Gruppe eine größere Vielfalt an Aussagen identifiziert wurde, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden konnten, die auf ein tiefergehendes Verständnis für Entwertung hinweisen. Es ist ebenfalls herauszustellen, dass die Hälfte der Teilnehmenden in ihren Erläuterungen selbstständig darauf Bezug nimmt, was zu sehen wäre, wenn sie das Szenario durch eine IR-Kamera beobachten würden. Diese Teilnehmenden weisen den Bildern die Bedeutung als Evidenz für die Umwandlung von Energie in innere Energie zu.

Auch im Zusammenhang mit dem Aspekt Energieerhaltung zeigt sich bei der Gruppe LmIR+ ein tiefergehendes Verständnis: Bei den periodischen Vorgängen beschreibt die Mehrheit der Teilnehmenden den Energieumwandlungsprozess in innere Energie unter Verwendung der Begriffe *komplett* oder *vollständig* und nimmt damit implizit Bezug auf die Anfangsmenge der Energie. Ein Drittel der Teilnehmenden stellt diesen Bezug in ihren Erläuterungen explizit her. Bei den nicht-periodischen Prozessen mit klar definiertem Ende beschreiben nahezu alle Teilnehmenden den Mengenerhalt während des Umwandlungsprozesses sowie des Energietransfers.

Demgegenüber konnten in der Gruppe LoIR nur einzelne Aussagen zum Mengenerhalt aus energetischer Sicht identifiziert werden, die auf einem eher allgemeineren Niveau ohne Bezug zum konkreten Szenario bleiben. Häufiger lassen sich Äußerungen finden, die als Regel zum Einhalten der Säulenhöhe beim Kontomodells formuliert sind.

8.5 Zusammenfassung und Diskussion der Studie EmIR+

Die Studie EmIR+ gliederte sich in zwei Untersuchungsziele:

- Die Untersuchung des Einflusses des entwickelten Lehrgangs mit Fokus auf Transfer bei Energieentwertungsprozessen auf das Verständnis für Energieentwertung und Energieerhaltung gegenüber traditionellen Energieunterricht.
- Die Untersuchung des Einflusses einer mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang auf den Lernerfolg gegenüber der Lehrgangsgruppe ohne Einsatz der IR-Kamera.

Die Datenerhebung erfolgte jeweils mittels Energietest sowie durch halbstandardisierte Interviews (vgl. Kapitel 6.2).

Um eine Aussage über den Einfluss des didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* auf das Verständnis für Entwertung und Erhaltung gegenüber traditionellem Energieunterricht treffen zu können, erfolgte zunächst ein Vergleich der Ziele sowie Inhalte der Lehrgänge. Es zeigte sich, dass sowohl die Lehrgangsziele als auch die durchgeführten Experimente des traditionellen Unterrichts in weiten Teilen mit denen des entwickelten Lehrgangs übereinstimmen. Dabei ist ebenfalls der für Energieentwertung ausgewiesene Stundenumfang mit dem des entwickelten Lehrgangs vergleichbar. Demnach gleicht sich der Unterricht der Untersuchungsgruppen auf Ebene der Sichtstruktur. Ebenso ist eine Zielkonvergenz feststellbar, sodass ein Vergleich des Lernerfolgs zwischen den Gruppen möglich ist. Jedoch ergibt sich auf Ebene der Tiefenstruktur durch den im entwickelten Lehrgang gesetzten Fokus auf Energietransfer bei Entwertungsprozessen eine Veränderung des Lernprozesses (vgl. zu Sicht- und Tiefenstruktur Leisen, 2011).

Die Analyse der Ergebnisse des Energietests zeigt sowohl in der Gruppe tE als auch in der Gruppe LoIR einen signifikanten Zuwachs im Verständnis für Entwertung und Erhaltung von Pre- zu Posttest⁶¹. Diese Zunahme im Verständnis wird durch die Auswertung der Interviewdaten bestätigt.

Um den Einfluss des didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* auf den Lernerfolg zu untersuchen, wurden die Daten ebenfalls hinsichtlich möglicher Gruppenunterschiede analysiert. In diesem Zusammenhang zeigte die Auswertung des Energietests, dass die Gruppe LoIR gegenüber der Gruppe tE ein signifikant höheres Verständnis für Entwertung und

⁶¹ Auch für die Aspekte Formen, Umwandlung und Transfer kann ein solcher signifikanter Zuwachs beobachtet werden.

Erhaltung aufweist. Die quantitative Analyse der Interviewdaten bestätigt diesen signifikanten Gruppenunterschied für den Aspekt Entwertung. Während die qualitative Analyse der Interviewdaten in der Gruppe LoIR eine Kontextabhängigkeit im Zusammenhang mit Energieentwertung zeigt, gehen in der Gruppe tE unabhängig vom Kontext nur einzelne Teilnehmende in ihren Erläuterungen auf Energieentwertung ein. Äußerungen dieser Gruppe zur Entwertung bleiben häufig unspezifisch, da der Vorgang nicht näher beschrieben wird.

Für den Aspekt Erhaltung zeigt sich in der quantitativen Analyse der Interviewdaten jedoch kein signifikanter Gruppenunterschied. In beiden Gruppen bleiben die Äußerungen auf einer allgemeinen Ebene wie beispielsweise „Die Energiemenge bleibt immer gleich“, wobei selten Bezug zum konkreten Szenario hergestellt wird.

Insgesamt korrespondieren die Ergebnisse des Energietests und der Interviewdaten mit der im Vorfeld getroffenen Annahme, dass der entwickelte Lehrgang durch Änderung in der Tiefenstruktur, d. h. durch den gesetzten Fokus des didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*, das Verständnis für Energieentwertung unterstützen kann. Darüber hinaus deutet das Ergebnis des Energietests darauf hin, dass in der Gruppe LoIR gegenüber der Gruppe tE ein gesteigertes Verständnis für Erhaltung vorliegt. Das zeigt sich jedoch nicht in den Interviewdaten. Damit kann die Forschungshypothese H3 für den Aspekt Entwertung bestätigt werden, für den Aspekt Erhaltung gilt dies jedoch nur eingeschränkt⁶².

Im Rahmen von EmIR+ wurde zudem eine Untersuchungsgruppe im Lehrgang mit mediendidaktischer Einbettung der IR-Kamera unterrichtet. Unter anderem absolvierten die Lernenden im Lehrgang einen IR-Kameraführerschein, der in der Studie von Köhn (2019) einen positiven Einfluss auf das Erstellen und Interpretieren von IR-Bildmaterial zeigte (vgl. Kapitel 8.3.1). Die Analyse der Energietestdaten ergab auch für die Gruppe LmIR+ einen signifikanten Zuwachs im Verständnis für Entwertung und Erhaltung von Pretest zu Posttest.

Um den Einfluss der mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang zu untersuchen, wurden die Daten ebenfalls hinsichtlich möglicher Unterschiede zur Gruppe LoIR analysiert. Während die Auswertung des Energietests für den Aspekt Entwertung keinen Gruppenunterschied zeigt, konnte für den Aspekt Erhaltung ein signifikanter Gruppenunterschied festgestellt werden: Die Gruppe LmIR+ erreichte ein signifikant höheres Verständnis als die Gruppe LoIR. Dieser Unterschied wird durch die Interviewdaten bestätigt und manifestiert sich

⁶² Mögliche Ursachen dieser Unterschiede in den Ergebnissen von Energietest und Interview werden in Kapitel 9.2 diskutiert.

in der Bezugnahme zum konkreten Szenario. Eine Vielzahl der Teilnehmenden dieser Gruppe nahm Bezug auf die Menge der entwerteten Energie im Vergleich zur Anfangsmenge und traf teilweise selbstständig Aussagen unter Annahme der Reibungsfreiheit. Darüber hinaus zeigt sich bei der Analyse der Interviewdaten ebenfalls ein signifikanter Gruppenunterschied für den Aspekt Entwertung, wobei die Gruppe LmIR+ eine signifikant höhere Komplexität erreichte. Dieser Unterschied äußert sich zum einen darin, dass die Teilnehmenden dieser Gruppe unabhängig vom Kontext den zugehörigen Energieentwertungsprozess beschreiben und zum anderen auch hier vermehrt Bezug auf das konkrete Szenario nehmen. Beispielsweise bringen die Teilnehmenden die Abnahme der Pendelamplitude mit dem Energieentwertungsprozess in Verbindung. Dies gelingt in der Gruppe LoIR nur einzelnen Teilnehmenden, wobei in dieser Gruppe ebenfalls eine Kontextabhängigkeit in den Aussagen zur Entwertung festgestellt werden konnte.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse des Energietests sowie der Interviews die Forschungshypothese, dass der Einsatz der IR-Kamera unter mediendidaktischer Einbettung zu einem gesteigerten Verständnis für Energieerhaltung gegenüber dem Lehrgang ohne IR-Kamera führt. Für den Aspekt Entwertung zeigt sich dies jedoch nur in den Ergebnissen der Interviewdaten. Demnach kann Forschungshypothese H4 für den Aspekt Erhaltung bestätigt werden, für den Aspekt Entwertung gilt dies jedoch nur eingeschränkt.

Bei der Interpretation der Ergebnisse des **Energietests** ist zu berücksichtigen, dass in der Untersuchungsgruppe LoIR von einer Klasse nur zum Testzeitpunkt T1 und T2 Daten erhoben wurden. Da jedoch alle untersuchten Klassen unabhängig von ihrer Gruppenzugehörigkeit im Pretest (T0) keine signifikanten Unterschiede im Verständnis für Entwertung und Erhaltung zeigen und auch im Whilettest (T1) auf Klassenebene keine signifikanten Unterschiede feststellbar sind, scheint eine Berücksichtigung dieser Klasse bei der Datenanalyse annehmbar.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die qualitativen Daten (**Interview**) nur für eine Subgruppe im Umfang von $N = 26$ Teilnehmenden erhoben wurden, wobei es sich um Schülerinnen und Schülern aus einer Klasse der Untersuchungsgruppen handelt. Dies bedeutet, dass die Interviewergebnisse nicht als repräsentativ für die gesamte Untersuchungsgruppe gelten können und damit sicherlich eine Grenze der Studie vorliegt. Jedoch ergibt eine Analyse der Energietestdaten innerhalb der Untersuchungsgruppen keine signifikanten Unterschiede auf Klassenebene, sodass ein Vergleich trotzdem Hinweise auf das vorliegende Verständnis für Entwertung und Erhaltung liefern kann. Weiterhin konnten von der Gruppe LmIR+ zum

Zeitpunkt T1 keine Interviews geführt werden, sodass in dieser Gruppe kein Pretest-Posttest Vergleich der Interviewdaten möglich ist. Bei der Interpretation der Gruppenunterschiede muss das Fehlen der Daten zum Zeitpunkt T1 berücksichtigt werden, da es möglich ist, dass ein Unterschied bereits im Vorfeld bestand und somit ggf. nicht auf die IR-Kamera zurückzuführen ist. Die quantitative Analyse der Interviewdaten zeigt im Mehrgruppenvergleich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen tE, LoIR und LmIR zum Zeitpunkt T1. Darüber hinaus sind auch im Energietest der Gruppe LmIR+ im Vergleich zur Gruppe LoIR keine signifikanten Unterschiede zu den Zeitpunkten T0 und T1 hinsichtlich Entwertung und Erhaltung feststellbar, sodass eine generelle Vergleichbarkeit des Vorwissens der Gruppen gegeben scheint.

Zusammengefasst konnte im Rahmen der Studie EmIR+ auf Grundlage der erhobenen Daten ein positiver Einfluss des Lehrgangs nach dem didaktischen Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* auf das Verständnis für Energieentwertung gegenüber traditionellem Unterricht nachgewiesen werden. Der Einsatz der IR-Kamera unter mediendidaktischer Aufbereitung führt zu einer Steigerung im Verständnis für Energieerhaltung. Es ist denkbar, dass das IR-Bildmaterial die für einen Konzeptaufbau benötigte Evidenz für Energieerhaltung liefern kann, sodass die Schülerinnen und Schüler über ein reines Verständnis des Prinzips der Energieerhaltung hinaus auch von diesem „überzeugt werden“ (Duit, 1995, S. 11; vgl. Kapitel 2.4.1 und 3.5.2). Ebenfalls geben die Interviewdaten Hinweise auf eine zusätzliche Steigerung im Verständnis für Entwertung.

9 Zusammenfassung der Studien EmIR und EmIR+

Die vorliegende Arbeit leistet anhand der quasi-experimentellen Untersuchung eines entwickelten Energielehrgangs, der Energieentwertungsprozesse fokussiert, einen Beitrag zur Unterrichtsforschung für das Energiekonzept. Zusätzlich zu bereits existierenden Studien wurde der Einfluss eines Lehrgangs mit Fokus auf Energietransfer bei dissipativen Prozessen auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung untersucht und zur Visualisierung der thermischen Prozesse eine IR-Kamera verwendet. Mithilfe der Studien EmIR und EmIR+ gelang es erstmals die Forschungslücke hinsichtlich der Untersuchung der Lernwirksamkeit von IR-Kameras im Zusammenhang mit dem Verständnis für die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung innerhalb eines Lehrgangs und bei größerer Stichprobe partiell zu schließen. Das Design sowie die Ergebnisse der Studien wurden detailliert in den Kapiteln 2 und 3 vorgestellt und diskutiert.

In diesem Kapitel sollen die Studien in Zusammenhang mit dem Forschungsziel gebracht und unter den folgenden Gesichtspunkten beleuchtet werden: Dabei handelt es sich einerseits um eine designbezogene Reflexion sowie andererseits um die Bewertung der Aussagekraft der Studien. Abschließend wird ein Ausblick gegeben, in dem noch offene, aber auch weiterführende Fragestellungen formuliert und neue Denkrichtungen dargelegt werden.

9.1 Ergebnisse der übergeordneten Forschungsfrage

Der Erwerb eines angemessenen Energieverständnisses, das bereits im Anfangsunterricht das Prinzip der Energieerhaltung mit einschließt, stellt für viele Schülerinnen und Schüler eine große Herausforderung dar. Trotz oftmals eingehender Thematisierung von Energieerhaltung im Physikunterricht gelingt es nur wenigen Schülerinnen und Schülern, ein Verständnis für Energieerhaltung zu entwickeln (vgl. Kapitel 2.5). Dabei gelten Energielehrgänge, die sich auf den Erhaltungsgedanken beschränken und die von Energieverbrauch geprägten Alltagserfahrungen von Lernenden nicht ausreichend berücksichtigen, als problematisch, da keine Verknüpfung zwischen der physikalischen Sichtweise und den Alltagserfahrungen stattfindet (Schlichting, 2000). Ein didaktischer Lösungsansatz für dieses Problem ist es, diese Verknüpfung durch die Betrachtung von Entwertungsprozessen herzustellen. Jedoch hat sich gezeigt, dass auch das Verständnis für Energieentwertung der Lernenden begrenzt ist. Ein schwerwiegender Grund für diese Lernschwierigkeiten ist, dass sich die Auswirkungen von

Energieentwertungsprozessen, insbesondere die damit einhergehende Temperaturerhöhung, häufig nur unzureichend beobachten lassen und damit ein wichtiger Indikator für diese Prozesse fehlt. Die Beobachtung von Temperaturänderungen gelingt mit einer IR-Kamera.

Das Ziel dieser Arbeit bestand deshalb darin, die Schülerinnen und Schüler bei der Verständnissentwicklung für Energieentwertungsprozesse zu unterstützen, indem zum einen Entwertungsvorgänge in den Fokus der Betrachtung gerückt werden und zum anderen eine Visualisierung dieser Vorgänge durch die IR-Kamera stattfindet. Diese Arbeit ist eingebettet in das Forschungsprojekt *Energieentwertung erfassbar machen*, in dem bereits Vorstudien mit gleicher Zielsetzung in informeller Lernumgebung stattfanden (vgl. Kapitel 4). Innerhalb dieses Dissertationsprojekts wurde sowohl auf Grundlage einer ausführlichen Analyse der in fachdidaktischer Forschung identifizierten Lernschwierigkeiten als auch der Erkenntnisse der Vorstudien *Nachmittags-* und *Ferienforscher*, ein Energielehrgang für den Einsatz im gymnasialen Anfangsunterricht der 7. Jahrgangsstufe entwickelt.

Grundlage der Konzeption bildet das didaktische Konzept *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*, welches bei Energieumwandlungs- und Übertragungsvorgängen den Fokus auf den dabei stattfindenden Energietransfer in die Umgebung legt (vgl. Kapitel 2.6). Dieser Fokus soll als Bindeglied zwischen den von Verbrauch geprägten lebensweltlichen Erfahrungen der Lernenden und dem physikalischen Energieerhaltungsprinzip fungieren, indem bei einer Vielzahl von verschiedenen Phänomenen und Experimenten der Schwerpunkt der Betrachtung auf die Energieentwertung und den damit verbundenen Energietransfer in die Umgebung gelegt wird. Dieses didaktische Konzept ermöglicht es, die betrachteten Vorgänge mittels IR-Kamera zu visualisieren (vgl. Kapitel 3.6). Aus diesen Überlegungen ergab sich die übergeordnete Forschungsfrage nach der Lernwirksamkeit eines Lehrgangs *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* und visueller Unterstützung durch die IR-Kamera:

Übergeordnete Forschungsfrage

Inwiefern verbessert der Fokus auf Energietransfer bei dissipativen Prozessen unter Visualisierung der Vorgänge mittels IR-Kamera das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung?

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde das in Tabelle 39 dargestellte 2x3 Design gewählt, wobei die gestrichelten Zellen aus methodischen Gründen nicht untersucht wurden (vgl. Kapitel 6.1). Ausgehend von diesem Design wurden vier Untersuchungsgruppen gebildet:

Die Gruppe *traditioneller Energieunterricht (tE)*, die im traditionellen Energieunterricht⁶³ unterrichtet wurde, die Gruppe *Lehrgang ohne IR-Kamera (LoIR)*, die im entwickelten Lehrgang (vgl. Kapitel 5) unterrichtet wurde, sowie die Gruppen *Lehrgang mit IR-Kamera und mit IR-Kamera+*. Der Unterschied zwischen den beiden IR-Kamera-Gruppen ergibt sich durch den Einsatz der IR-Kamera innerhalb des entwickelten Lehrgangs. Während in der Gruppe *Lehrgang mit IR-Kamera (LmIR)* die Kamera im Lehrgang als zusätzliches Messinstrument ohne mediendidaktische Einbettung eingesetzt wurde, erfolgte in der Gruppe *Lehrgang mit IR-Kamera+ (LmIR+)* eine mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera, die sich in der Abstimmung des Lehrgangs auf die IR-Kamera zeigt. In diesem Zusammenhang wurde in der Gruppe LmIR+ unter anderem ein IR-Kameraführerschein absolviert, der nachweislich zu einer Steigerung der Fähigkeiten hinsichtlich der Aufnahme und Interpretation von IR-Bildmaterial führt (vgl. Kapitel 8.3.1).

Die quasi-experimentelle Feldstudie wurde mit $N = 255$ Schülerinnen und Schülern bzw. zehn Schulklassen an Hannoveraner Gymnasien in den Schuljahren 2016/17, 2017/18 und 2018/19 mit insgesamt sechs verschiedenen Lehrpersonen durchgeführt.

Tabelle 39: Untersuchungsdesign.

	mit Lehrgang	ohne Lehrgang
ohne IR-Kamera	$N = 72$ $(m = 40; w = 32)$ Interview: $N = 8$	$N = 75$ $(m = 35; w = 40)$ Interview: $N = 9$
mit IR-Kamera	$N = 25$ $(m = 8, w = 17)$ Interview: $N = 8$	X
mit IR-Kamera+	$N = 81$ $(m = 33; w = 48)$ Interview: $N = 9$	X

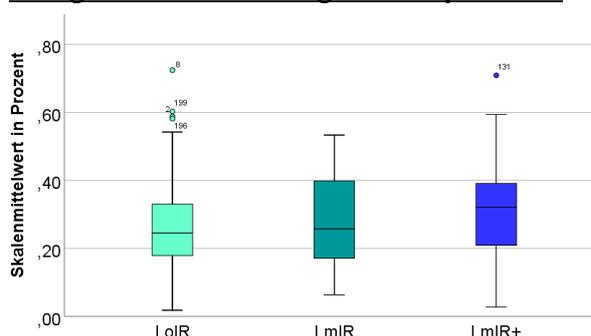
Zur Datenerhebung wurde ein Pretest-Whilettest-Posttest-Design im Mixed-Methods-Ansatz gewählt, welches sowohl qualitative als auch quantitative Erhebungs- und Analysemethoden umfasst. Als Testinstrumente wurden zum einen ein Energietest von Michel (2018) adaptiert,

⁶³ Eine ausführliche Dokumentation dieses Unterrichts findet sich in Kapitel 8.4.3.1.

der neben Multiple Choice Items ebenfalls offene Items beinhaltet. Zusätzlich wurden mit einer Subgruppe (N = 34) der Stichprobe halbstandardisierte Interviews durchgeführt, die sowohl quantitativ als auch qualitativ ausgewertet wurden. Im Rahmen der Interviews wurden den Schülerinnen und Schülern vier Alltagsszenarien präsentiert, bei denen Bezug auf die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung genommen werden sollte (vgl. Kapitel 6.2.2). Dabei handelte es sich um zwei periodische Prozesse sowie zwei nicht periodische Prozesse mit klar erkennbarem Ende. Der Mixed-Methods-Ansatz ermöglicht den Vergleich der Ergebnisse, die durch die unterschiedlichen Erhebungsmethoden generiert wurden, insbesondere können komplementäre Informationen gewonnen werden. Beispielsweise ermöglicht die qualitative Analyse der Interviews Erkenntnisse über die Vorstellungen der Lernenden hinsichtlich der untersuchten Aspekte und gibt somit Aufschluss darüber, wie sich mögliche Gruppenunterschiede im Verständnis manifestieren.

Zur Untersuchung der übergeordneten Forschungsfrage nach dem Einfluss des entwickelten Lehrgangs unter Visualisierung der Vorgänge mittels IR-Kamera auf das Verständnis für Entwertung und Erhaltung wurden die Daten des **Energietests** der Studien EmIR und EmIR+ zusammengeführt und die Ergebnisse des Pretests (T0) auf Gruppenunterschiede mittels Kruskal-Wallis-Test analysiert⁶⁴. Dabei ergeben sich keine signifikanten Gruppenunterschiede (Entwertung: $H = 1.597$, $p = .450$, $w = .088$, $1-\beta = .13$; Erhaltung: $H = .058$, $p = .971$, $w = .0167$, $1-\beta = .05$)⁶⁵. Dies bedeutet, dass eine Vergleichbarkeit des Vorwissens der Untersuchungsgruppen angenommen werden kann.

Energietest: Entwertung Testzeitpunkt T1



Energietest: Erhaltung Testzeitpunkt T1

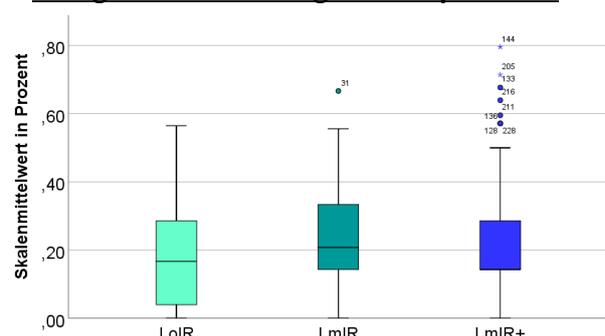


Abbildung 57: Gruppenvergleich auf Grundlage der Energietestdaten zum Testzeitpunkt T1 (Whilettest) für die Lehrgangsguppen.

⁶⁴ Zu beachten ist hier, dass von zwei Klassen zu diesem Testzeitpunkt keine Daten erhoben wurden. Die Begründung sowie die Diskussion der Auswirkungen auf die Aussagekraft der Ergebnisse wurde in Kapitel 8 vorgenommen.

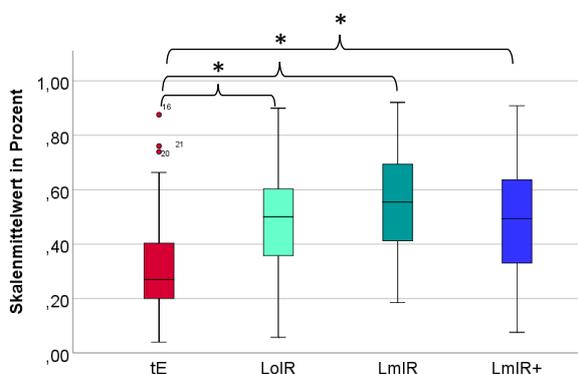
⁶⁵ Bei der Berechnung konnten die Daten einer Klasse der Gruppe, die im Lehrgang ohne IR-Kamera unterrichtet wurde, sowie der Gruppe *Lehrgang mit IR-Kamera* nicht berücksichtigt werden. Die Gründe finden sich im Design der Studie EmIR wieder und werden in den Kapiteln 7 und 8 ausführlich dargelegt. Eine Vergleichbarkeit dieser Daten mit dem übrigen Datensatz ergibt sich durch die Durchführung des Whiletests in allen Lehrgangsklassen. Dieser Test zum Zeitpunkt T1 wurde ebenfalls in den EmIR-Klassen durchgeführt.

Auch im Whilettest zum Testzeitpunkt T1, der aus Gründen der Vergleichbarkeit nur mit den Lehrganggruppen mit und ohne IR-Kamera direkt vor der expliziten Einführung der Aspekte Entwertung und Erhaltung (Intervention) durchgeführt werden konnte (vgl. Kapitel 8.4), zeigen sich keine signifikanten Gruppenunterschiede (Entwertung: $H = 3.017$, $p = .221$, $w = .129$; $1-\beta = .22$; Erhaltung: $H = 2.110$, $p = .348$, $w = .108$, $1-\beta = .16$, vgl. Abbildung 57). Dieses Ergebnis ist erwartungskonform, da sich der Energielehrgang Teil 1 in allen Untersuchungsgruppen gleich und noch keine explizite Thematisierung der Aspekte Entwertung und Erhaltung stattfand. Zudem wurde die IR-Kamera bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht gezielt zur Visualisierung im Zusammenhang mit dissipativen Prozessen eingesetzt.

Die Analyse der Energietestdaten zeigt in allen Gruppen eine signifikante Steigerung im Verständnis für Entwertung und Erhaltung von Pretest zu Posttest mit großem Effekt, sodass auf eine Lernwirksamkeit *aller* untersuchten Lehrgänge geschlossen werden kann (eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse findet sich in den Kapiteln 7.3.2.1 und 8.4.3). Dieses Ergebnis schließt die Untersuchungsgruppe des traditionellen Energieunterrichts mit ein, sodass alle untersuchten Lehrgänge als lernwirksam hinsichtlich Energieentwertung und Energieerhaltung bezeichnet werden können.

Für den Vergleich der Untersuchungsgruppen auf mögliche Unterschiede in der Lernwirksamkeit wurden die Posttest-Daten ebenfalls im Blick auf Gruppenunterschiede untersucht. Der paarweise Vergleich zeigt, dass alle Lehrganggruppen ein signifikant höheres Verständnis für Energieentwertung mit moderatem Effekt erzielen als die Gruppe tE ($H = 46.529$, $p = .000$, $w = .42$, $1-\beta = .99$). Es ergeben sich jedoch unabhängig vom Einsatz der IR-Kamera keine Unterschiede zwischen den Lehrganggruppen.

Energietest: Entwertung Testzeitpunkt T2



Energietest: Erhaltung Testzeitpunkt T2

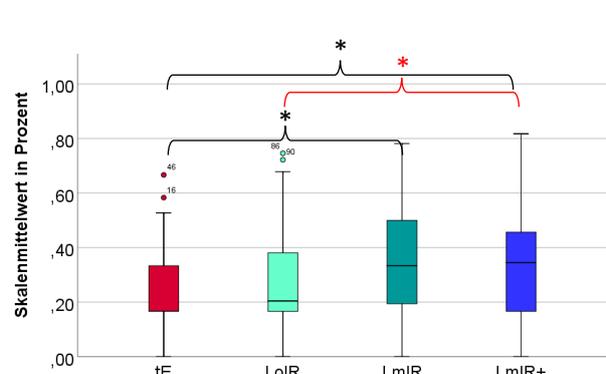


Abbildung 58: Gruppenvergleich auf Grundlage der Energietestdaten zum Testzeitpunkt T2 (Posttest) über alle Gruppen.

Die Analyse der Posttest-Daten für den Aspekt Erhaltung ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen mit moderatem Effekt ($H = 27.048$, $p = .000$, $w = .33$, $1-\beta = .97$, vgl. Abbildung 58). Der paarweise Vergleich zeigt, dass Unterschiede zwischen den Lehrgangsgruppen unter Verwendung der IR-Kamera gegenüber dem traditionellen Energieunterrichts bestehen. Herauszustellen ist jedoch der Gruppenunterschied zwischen zwei Lehrgangsgruppen: Die Gruppe LmIR+ erreicht ein signifikant höheres Verständnis als die Gruppe LoIR (vgl. Abbildung 58, rot markiert).

Einschränkend ist zu erwähnen, dass trotz der signifikanten Steigerung auch in den Lehrgangsgruppen weiterhin nur ungefähr 50% der Energieentwertungssitems korrekt beantwortet werden konnten; bei Erhaltung nur 35%. Im Vergleich zur traditionellen Energieunterrichtsgruppe liegt der Anteil korrekt gelöster Items bei diesen Aspekten jedoch doppelt so hoch, sodass die erzielten Lernerfolge beachtlich sind.

Eine Untersuchung der Energietestdaten hinsichtlich eines Zusammenhangs zwischen dem Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung mit Hilfe der Rangkorrelation nach Spearman ergibt zum Testzeitpunkt T2 eine Korrelation mit moderatem Effekt ($r_s = 0.49$, $p = .000$, $N = 255$). Tabelle 40 zeigt die Korrelation in den einzelnen Untersuchungsgruppen.

Tabelle 40: Rangkorrelation nach Spearman.

tE, $n = 75$	LoIR, $n = 74$	LmIR, $n = 25$	LmIR+, $n = 81$
$r_s = .315, p = .006$	$r_s = .345, p = .003$	$r_s = .636, p = .001$	$r_s = .563, p = .006$

In allen Untersuchungsgruppen liegt eine Korrelation zwischen dem Verständnis von Energieentwertung und -erhaltung vor, in den Gruppen, die eine IR-Kamera im Lehrgang nutzen, mit großem Effekt (vgl. HüF, Kapitel 4.2).

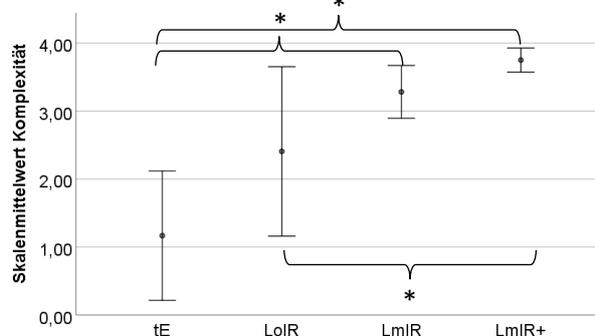
Die quantitative Analyse der **Interviewdaten** zeigt keine signifikanten Gruppenunterschiede zum Testzeitpunkt T1 und bestätigt damit die Ergebnisse der Energietestdaten (Entwertung: $H = .296$, $p = .862$, $w = 0,11$, $1-\beta = .07$; Erhaltung: $H = .905$, $p = .636$, $w = .19$, $1-\beta = .12$).

Der Gruppenvergleich zum Testzeitpunkt T2 zeigt sowohl für Entwertung als auch Erhaltung einen signifikanten Gruppenunterschied mit großem Effekt (Entwertung: $H = 22.981$, $p = .000$, $w = .82$, $1-\beta = .98$; Erhaltung: $H = 10.829$, $p = .013$, $w = .56$, $1-\beta = .79$).

Im paarweisen Vergleich ergeben sich für Entwertung die folgenden Unterschiede: Die Gruppe LmIR+ erreicht gegenüber den Gruppen tE und LoIR eine signifikant höhere Komplexität. Darüber hinaus ergibt sich für die Gruppen tE und LmIR ein signifikanter Unterschied in der erreichten Komplexität. Für den Aspekt Erhaltung ergibt sich hier ein ähnliches Bild: Die

Gruppe LmIR+ erreicht gegenüber den Gruppen LoIR sowie tE eine signifikant höhere Komplexität.

Interview: Entwertung Testzeitpunkt T2



Interview: Erhaltung Testzeitpunkt T2

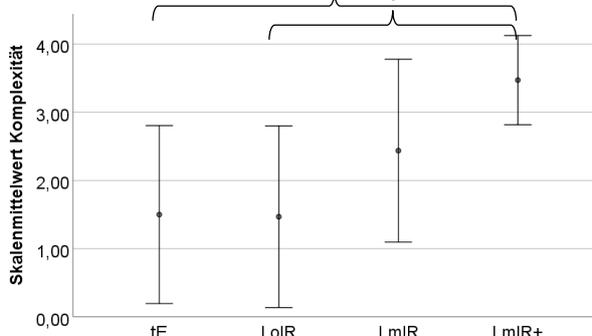


Abbildung 59: Gruppenvergleich auf Grundlage der Interviewdaten über alle Gruppen zum Testzeitpunkt T2.

Bei der Betrachtung von Abbildung 59 ist augenfällig, dass die erreichte Komplexität für den Aspekt **Entwertung**, angefangen von der Gruppe tE bis hin zur Gruppe LmIR+, treppenartig ansteigt. Anhand der qualitativen Analyse⁶⁶ der Interviewdaten zeigt sich über die Gruppen hinweg eine Zunahme in der Berücksichtigung der Energieentwertung für den Umwandlungsprozess sowie den Energietransfer in die Umgebung (vgl. Tabelle 41). Dabei kann eine zunehmende Unabhängigkeit vom Alltagszenario festgestellt werden: Während die Gruppe tE unabhängig vom Szenario nur vereinzelt Bezug zur Entwertung nimmt, kann bei der Gruppe LoIR eine Kontextabhängigkeit des Verständnisses für Entwertung festgestellt werden. Die Gruppen, die eine IR-Kamera zur Visualisierung der Vorgänge verwendet haben, treffen unabhängig vom Szenario Aussagen über den Entwertungsprozess.

Ebenfalls kann bei den Aussagen zu den phänomenologischen Auswirkungen der Entwertung für den Umwandlungsprozess eine Steigerung in der Bezugnahme zum konkreten Szenario festgestellt werden: Während in den Gruppen tE und LoIR nur vereinzelt Aussagen über die Abnahme der Amplitude identifiziert werden können, nehmen beim Pendel in der Gruppe LmIR alle Teilnehmenden auf die Abnahme der Amplitude Bezug. In der Gruppe LmIR+ verknüpft die Mehrheit der Teilnehmenden bei allen Szenarien die phänomenologische Ebene des konkreten Vorgangs mit der Entwertung (vgl. Tabelle 41).

⁶⁶ Eine ausführliche Dokumentation der qualitativen Analyse der Interviews findet sich in den Kapiteln 7 und 8.

Tabelle 41: Überblick über die Ergebnisse der qualitativen Analyse der Interviewdaten zum Zeitpunkt T2. Der durchschnittliche Ausprägungsgrad der Aussagen sowie die genaue Versuchspersonenzahl sind den Kapiteln 7.3.2.2 und 8.4 nachzulesen.

	trad. Energieunterricht	Lehrgang ohne IR	Lehrgang mit IR	Lehrgang mit IR+
periodische Vorgänge	<ul style="list-style-type: none"> Die Mehrheit der Teilnehmenden nimmt keinen Bezug auf Energieentwertung. Vorwiegend idealierte Betrachtung der Vorgänge Aussagen zur Entwertung bleiben eher unspezifisch, d. h. der Vorgang wird nicht näher erläutert. 	<p>Eine Mehrheit der Teilnehmenden beschreibt</p> <ul style="list-style-type: none"> die Umwandlung von Energie in innere Energie einen Energietransfer in die Umgebung <p>Vereinzelt Bezugnahme auf die Abnahme der Amplitude</p>	<p>Alle Teilnehmenden äußern sich über</p> <ul style="list-style-type: none"> die Umwandlung von Energie in innere Energie den Energietransfer in die Umgebung <p>Mehrheit nimmt <u>beim Pendel</u> Bezug auf die Abnahme der Amplitude.</p>	<p>Alle Teilnehmenden äußern sich über</p> <ul style="list-style-type: none"> die Umwandlung von Energie in innere Energie den Energietransfer in die Umgebung <p>Alle Teilnehmenden nehmen Bezug auf die Abnahme der Amplitude.</p> <p>Vereinzelt Äußerungen zum Weitertransport der Energie in der Umgebung</p>
nicht-periodische Vorgänge	<ul style="list-style-type: none"> Vereinzelt Unsicherheit beim Verbleib der Energie zu Prozessende bzw. bei der Zuordnung einer Energieform <p>→ Aussagen unabhängig vom Szenario (periodisch/nicht-periodisch)</p>	<p>Es kann eine Kontextabhängigkeit festgestellt werden, die sich in der Erläuterung der Energieumwandlung bzw. dem Energietransfer zeigt.</p> <p>Vereinzelt Bezugnahme auf die Folgen der Entwertung für den Umwandlungsprozess</p>	<p>Alle Teilnehmenden äußern sich über</p> <ul style="list-style-type: none"> die Umwandlung von Energie in innere Energie den Energietransfer in die Umgebung <p>Vereinzelt Bezugnahme auf die Folgen der Entwertung für den Umwandlungsprozess</p>	<p>Alle Teilnehmenden äußern sich über</p> <ul style="list-style-type: none"> die Umwandlung von Energie in innere Energie den Energietransfer in die Umgebung <p>Mehrheit nimmt Bezug auf die Folgen der Entwertung für den Umwandlungsprozess <u>beim rutschenden Kind</u></p>
IR-Kamera			<p>Kein*e Teilnehmende*r zieht zur Argumentation die IR-Kamera heran.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Die Hälfte der Teilnehmenden nimmt in ihren Erläuterungen selbstständig Bezug auf die IR-Kamera. Bedeutungszuweisung als Evidenz für die Umwandlung von Energie in innere Energie

Augenfällig ist, dass die Hälfte der Teilnehmenden dieser Gruppe selbstständig Bezug auf die IR-Kamera nimmt und diese in ihren Erläuterungen als Evidenz für die Umwandlung von Energie in innere Energie heranzieht. Demgegenüber wird in der Gruppe LmIR die IR-Kamera von keinem der Teilnehmenden erwähnt.

Dies weist darauf hin, dass die getroffenen Maßnahmen zur Abstimmung des Lehrgangs auf den Einsatz der IR-Kamera zu einer Bedeutungszuweisung des IR-Bildmaterials als Evidenz für Energiebewertungsprozesse geführt haben.

Beim Aspekt **Erhaltung** fällt auf, dass die Gruppen tE und LoIR im Wesentlichen eine ähnliche Komplexität erreichen (vgl. Abbildung 59). Die qualitative Analyse zeigt, dass die Aussagen auf einem eher allgemeineren Niveau bleiben und selten Bezug zum konkreten Szenario hergestellt wird. Dies gilt ebenso für die Gruppe LmIR. Demgegenüber nimmt die Mehrheit der Teilnehmenden in der Gruppe LmIR+ sowohl implizit als auch explizit Bezug auf den Erhalt der Anfangsmenge der Energie beim konkreten Szenario.

Zentrale Ergebnisse der vorliegenden Arbeit

- Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Studien, dass der **entwickelte Lehrgang mit Fokus auf Transfer** bereits ohne den Einsatz der IR-Kamera zu einer signifikanten **Steigerung des Verständnisses für Energiebewertung** gegenüber traditionellem Energieunterricht führt⁶⁷.
- Die Ergebnisse der Interviewdaten geben Hinweise darauf, dass der mediendidaktisch eingebettete **Einsatz einer IR-Kamera** zur Visualisierung der thermischen Prozesse im Rahmen von dissipativen Prozessen im entwickelten Lehrgang zu einer zusätzlichen **Steigerung im Verständnis für Energiebewertung** führt.
- Die **mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera** führt zu einer zusätzlichen **Steigerung im Verständnis für Energieerhaltung** gegenüber dem entwickelten Lehrgang sowie dem traditionellen Energieunterricht.

⁶⁷ Dabei ist die gemessene Effektstärke vergleichbar mit Effektstärken, die in aktuellen Studien zur Lernwirksamkeit neuer Unterrichtsansätze für das Energiekonzept beobachtet wurden; bspw. berichten Fortus et al. (2019) in einer Studie zum „System-Transfer“ Ansatz gegenüber Vergleichsunterricht von einer Steigerung im Verständnis mit moderatem Effekt.

9.2 Diskussion und Reflexion

In der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, einen Energielehrgang für den Anfangsunterricht der 7./8. Jahrgangsstufe zu entwickeln, der zu einer Steigerung im Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung führt. Da der entwickelte **Lehrgang** an den Zielen, Inhalten und Begrifflichkeiten des nds. Kerncurriculums für das Gymnasium orientiert ist und auf traditionelle Schulexperimente sowie Experimentiermaterial zurückgreift, kann dieser sowohl mit als auch ohne Visualisierung der Vorgänge durch eine IR-Kamera in der gymnasialen Mittelstufe in Niedersachsen eingesetzt werden. Grundsätzlich kann der Lehrgang jedoch auch für den Energieunterricht in anderen Bundesländern adaptiert werden, in denen bereits im Anfangsunterricht ein Verständnis für Entwertung und Erhaltung entwickelt werden soll. Hierzu zählen u. a. Hamburg, Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz (eine Übersicht findet sich im Anhang A, S.294).

Die Ergebnisse der Studie EmIR+ haben gezeigt, dass eine mediendidaktische Einbettung der **IR-Kamera** bzw. des IR-Bildmaterials in den entwickelten Lehrgang das Verständnis für Energieerhaltung zusätzlich steigert. Dabei sind die Grundideen der Maßnahmen zur mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera jedoch unabhängig vom Themenbereich Energie und ebenso in anderen Themenbereichen oder Unterrichtsfächern umsetzbar, in denen die IR-Kamera zur Visualisierung von Phänomenen eingesetzt werden kann (vgl. Kapitel 3.5.3). Beispielsweise greift der IR-Kameraführerschein unabhängig vom Themenbereich Energie die Herausforderungen bei der Aufnahme sowie Interpretation von IR-Bildmaterial auf und kann die Schülerinnen und Schüler beim eigenständigen Experimentieren mit der IR-Kamera unterstützen. Grundsätzlich ist es möglich den Lernenden im Unterricht „überzeugendes“ IR-Bildmaterial zur Verfügung zu stellen, welches das zu beobachtende Phänomen deutlich zeigt und eine Bedeutungszuweisung der Bilder als Evidenz ermöglicht.

In den Kapiteln 7 und 8 erfolgte eine kritische Auseinandersetzung mit den Studien EmIR und EmIR+. In diesem Kapitel soll ergänzend zu diesen Betrachtungen eine studienübergreifende aspektorientierte Reflexion erfolgen, in der konzeptuelle Entscheidungen zum Design diskutiert und Limitationen aufgezeigt werden.

Korrektur der Alpha-Fehler Kumulation

Zur Prüfung der Unterschiedshypothesen (Kapitel 4.2) wurden die erhobenen Daten auf Gruppenunterschiede analysiert und unter Berücksichtigung des festgelegten Alpha-Fehlerniveaus auf Signifikanz geprüft (Kapitel 6.2.4). Generell muss bei der Datenanalyse zwischen Zweigruppen- und Mehrgruppenvergleichen unterschieden werden. Bei Mehrgruppenvergleichen werden mehr als zwei Gruppen paarweise auf Gruppenunterschiede geprüft, wobei die Alpha-fehlerwahrscheinlichkeit bei jedem der Vergleiche bei 5% liegt. Die Fehler sind jedoch nicht unabhängig voneinander zu sehen, sodass es mit steigender Zahl der Vergleiche zu einer Fehlerkumulation kommt und somit das Signifikanzniveau über 5% liegt. Man spricht von einer Kumulation des Alphafehlers.

Im Rahmen der Studie EmIR+ werden zur Untersuchung der Daten auf Gruppenunterschiede die Daten der Gruppe LoIR jeweils als Vergleichsgruppe herangezogen, sodass die durchgeführten Signifikanztests der paarweisen Vergleiche abhängig voneinander sind. *„Die Auswirkung dieser Abhängigkeit ist, dass ein signifikantes Ergebnis in einem Test die Wahrscheinlichkeit für ein anderes signifikantes Ergebnis erhöht.“* (Bühner, 2006, S. 330). Daher wird für abhängige Tests eine Fehlerkorrektur empfohlen (Bühner, 2006).

Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit bei der Studie EmIR+ eine Bonferroni-Holm Korrektur vorgenommen. Zusammenfassend ergeben sich nach der Korrektur des Signifikanzniveaus keine Abweichungen in den Ergebnissen, d.h. die in Kapitel 8 ausgewiesenen Signifikanzen ändern sich durch die Korrektur nicht.

Zur Untersuchung der übergeordneten Forschungsfrage wurden die Ergebnisse der Studien EmIR und EmIR+ im Rahmen eines Mehrgruppenvergleichs zusammengeführt. In diesem Zusammenhang musste aufgrund der Abhängigkeit der Signifikanztests erneut eine Korrektur des Signifikanzniveaus vorgenommen werden, da die Anzahl der abhängigen Vergleiche durch die Zusammenführung der Daten gestiegen ist. Dies hat zur Folge, dass es zu Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der Studie EmIR+ und der Zusammenführung kommen kann.

Diese Korrektur des Alphafehlerniveaus wurde in der Darlegung der Ergebnisse in Kapitel 9.1 bereits berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit ergibt sich im Rahmen der Studie EmIR+ ein signifikanter Gruppenunterschied im Verständnis für Energieerhaltung zwischen den Gruppen tE und LoIR mit kleinem Effekt. Im Mehrgruppenvergleich der Zusammenführung liegt der p-Wert nach der Bonferroni-Holm Korrektur oberhalb des Signifikanzniveaus. Gründe für ein nicht signifikantes Ergebnis können sein, dass der Effekt in der hier untersuchten Stichprobe

nicht stark genug ausgeprägt ist oder nur ein sehr geringer und damit vernachlässigbarer Effekt vorliegt (Mehler, Edelsbrunner & Matic, 2019). Da im Zweigruppenvergleich eine niedrige Effektstärke (bei annehmbarer Teststärke) beobachtet wurde, kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass hier ein vernachlässigbarer Effekt vorliegt, sodass die Hypothese H3 für den Aspekt Erhaltung nicht eindeutig belegt werden kann.

Einfluss darauf, ob ein vorhandener Effekt tatsächlich nachgewiesen werden kann, hat der gewählte Stichprobenumfang. Bei vergleichbaren Untersuchungen von Unterrichtskonzepten für das Energiekonzept (bspw. Fortus et al., 2019) konnten moderate Effekte des neuen Ansatzes gegenüber dem Vergleichsunterricht nachgewiesen werden. Mit dem Programm G*Power kann unter Kenntnis der Effektstärke mit festem Signifikanzniveau und festgelegter Teststärke der für diesen Effekt benötigte Stichprobenumfang berechnet werden. Für einen Mehrgruppenvergleich von vier Untersuchungsgruppen (wobei $\alpha = .05$, $1-\beta = .8$, $df = 2$) wird für einen moderaten Effekt ein Gesamtstichprobenumfang von $N=158$ benötigt, für einen kleinen Effekt dagegen $N=967$. Daher ist der in der vorliegenden Arbeit untersuchte Stichprobenumfang mit $N=255$ für den Nachweis eines moderaten Effekts als ausreichend zu bewerten, für den Nachweis eines kleinen Effekts jedoch nicht.

Bei den Interviewdaten sind durch die Korrektur der Prüfgröße im Mehrgruppenvergleich beim Aspekt Entwertung die Unterschiede zwischen den Gruppen tE und LoIR sowie LoIR und LmIR nicht signifikant. Obwohl der in der Studie EmIR und EmIR+ festgestellte mittlere bis große Effekt auf einen überzufälligen und damit annehmbaren Gruppenunterschied hindeutet, können die Interviewdaten einen Unterschied nicht eindeutig belegen, sodass dieser weiterhin zu prüfen bleibt.

Die im Hinblick auf das Forschungsziel bedeutsamen Ergebnisse des Energietests sowie der Interviewdaten zeigen jedoch sowohl im Zweigruppen- als auch im Mehrgruppenvergleich signifikante Gruppenunterschiede mit moderatem Effekt. Es konnte in der vorliegenden Arbeit in den Gruppen, die im entwickelten Lehrgang *Entwertung mit Fokus auf Transfer* unabhängig vom Einsatz der IR-Kamera unterrichtet wurden, ein im Vergleich zum traditionellen Energieunterricht signifikant gesteigertes Verständnis für Energieentwertung festgestellt werden. Die mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera führt darüber hinaus zu einer signifikanten Steigerung des Verständnisses für Energieerhaltung sowohl gegenüber dem traditionellen Energieunterricht als auch gegenüber dem entwickelten Lehrgang ohne Einsatz der IR-Kamera (für eine detaillierte Darstellung vgl. Kapitel 9.1).

Aussagekraft der Interviewdaten

Bei der Interpretation der Ergebnisse der quantitativen sowie qualitativen Analyse der Interviews ist zu berücksichtigen, dass diese nur mit einer Subgruppe der Untersuchungsgruppen durchgeführt wurden, was sich auf die Präzision der Ergebnisse auswirkt. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf deren Aussagekraft für die gesamte Stichprobe berücksichtigt werden. Die Zusammensetzung der Subgruppen aus dem Leistungsspektrum von leistungsstarken bis leistungsschwachen Schülerinnen und Schülern spricht für eine Repräsentativität der Ergebnisse der Subgruppe auf Klassenebene⁶⁸. Für eine Vergleichbarkeit auf Gruppenebene spricht, dass im Energietest zwischen den Klassen einer Untersuchungsgruppe keine signifikanten Unterschiede feststellbar sind.

Trotz der Limitation der Aussagekraft durch die Stichprobengröße können die Interviewdaten wichtige Hinweise auf eine Steigerung des Verständnisses für Energieentwertung durch den Einsatz der IR-Kamera unter mediendidaktischer Einbettung gegenüber den Vergleichsgruppen geben. Dies zeigt sich auch in der qualitativen Analyse der Interviewdaten, in der Gruppenunterschiede in den Beschreibungen bzw. Erklärungen der Alltagsphänomene festgestellt werden konnten. Beispielsweise wurde deutlich, dass die Gruppe LmIR+ die Energieentwertung in ihren Äußerungen unabhängig vom Alltagszenario berücksichtigt und die Beschreibungen inhaltlich differenzierter ausfallen als in den Vergleichsgruppen. Diese Erkenntnisse ergänzen die Ergebnisse des Energietests.

Unterschiede zwischen den Ergebnissen des Energietests sowie den Interviewdaten

Sowohl in der Studien EmIR und EmIR+ als auch in der studienübergreifenden Auswertung ergeben sich bei der Analyse der Daten hinsichtlich der Gruppenunterschiede Divergenzen zwischen den Ergebnissen des Energietests und der qualitativen Interviewdaten.

Eine fehlende Übereinstimmung der Ergebnisse unterschiedlicher Messinstrumente muss nicht unbedingt heißen, dass beispielsweise die Interviews weniger valide sind als der Energietest oder umgekehrt. Es ist nicht anzunehmen, dass die Anwendung verschiedener Methoden zur Erfassung des Verständnisses für Energieentwertung und -erhaltung notwendigerweise zu denselben Ergebnissen führt, da diese jeweils eine konstituierende Wirkung auf den

⁶⁸ Eine Diskussion einer möglichen Einschränkung der Aussagekraft der Interviews durch die Stichprobengröße bzw. Zusammensetzung wird in den Kapiteln 7 und 8 vorgenommen.

Untersuchungsgegenstand haben (Hussy et al., 2013, S. 289). Zweck des Einsatzes unterschiedlicher Methoden ist daher weniger die gegenseitige Validierung der Methoden, sondern vielmehr verschiedene Facetten des Untersuchungsgegenstandes zu erfassen, die sich zu einem vervollständigten Bild ergänzen (Hussy et al., 2013). Divergenzen sind demnach nicht unbedingt als negativ zu sehen, da sie neue Sichtweisen auf den Untersuchungsgegenstand eröffnen können. Trotzdem sind diese kritisch zu hinterfragen (Hussy et al., 2013), weshalb diese im Folgenden diskutiert werden:

Ein Grund für die Divergenz zwischen den Ergebnissen von Interview und Energietest beim Aspekt *Entwertung* könnten unterschiedliche Anforderungen an die Lernenden durch das Aufgabenformat sein. Während die Schülerinnen und Schüler im Interview aufgefordert werden, sich zur Entwertung bei diesem Szenario zu äußern und diesen Vorgang selbstständig mit beispielsweise der Abnahme der Pendelamplitude in Verbindung bringen müssen, wird dieser Bezug im Energietest durch die Fragestellung sowie die Antwortmöglichkeiten der Items bereits vorgegeben. Im Zusammenhang mit dem Pendel wird im Item 12 z. B. explizit nach dem Grund der Abnahme der Pendelamplitude gefragt (vgl. Anhang C.1 S. 263). Als Antwortmöglichkeit wird die Übertragung von Bewegungsenergie an die Luft oder die Aufhängung vorformuliert⁶⁹. Die Distraktoren greifen Vorstellungen zum Energieverbrauch bzw. die anthropozentrische Sichtweise auf (vgl. Kapitel 2.4). Damit wird durch das Aufgabenformat bereits eine Verknüpfung zwischen der Abnahme der Pendelamplitude und der Übertragung von Energie an die Umgebung hergestellt. Insgesamt lassen sich fünf Items finden, in denen nach Gründen gefragt wird, warum die beschriebenen Vorgänge zum Stillstand kommen und als Antwort die Umwandlung in innere Energie oder Energieübertragung vorgegeben. Dabei handelt es sich um Aussagen, die im Interview in beiden Gruppen mit mittlerem bis hohem durchschnittlichem Ausprägungsgrad identifiziert werden konnten. Unterschiede ergeben sich auf Grundlage der qualitativen Analyse der Interviews überwiegend bei der selbstständigen Verknüpfung der phänomenologischen Ebene mit der Energieentwertung. Diese Verknüpfung musste jedoch von den Teilnehmenden im Energietest nicht selbstständig hergestellt werden.

Beim Vergleich zwischen den Energietestitems für den Aspekt *Erhaltung* und den Interviewfragen fällt auf, dass im Rahmen des Energietests Energieerhaltung vermehrt herangezogen

⁶⁹ Da es sich bei Bewegungsenergie um eine Zustandsgröße und bei übertragener Energie um eine Prozessgröße handelt, ist die Formulierung dieses Items aus fachlicher Sicht ungenau. Jedoch wurde die Formulierung des etablierten Testinstruments aus methodischen Gründen beibehalten.

werden muss, um Vorhersagen bei idealisierten Vorgängen zu treffen, während im Interview darauf im Zusammenhang mit dem jeweiligen Alltagsszenario als Realprozess Bezug genommen werden soll. Beispielsweise sollten die Teilnehmenden im Energietest die Geschwindigkeit einer Kugel nach dem Überrollen eines Hügels vorhersagen. Demgegenüber wurden die Teilnehmenden im Interview aufgefordert sich zur Energieerhaltung beim vorliegenden Szenario zu äußern, sollten diese jedoch nicht explizit heranziehen, um Vorhersagen unter Annahme der Reibungsfreiheit zu treffen. Damit werden im Interview und im Energietest unterschiedliche Aspekte des Verständnisses für Energieerhaltung erhoben.

Limitationen durch ein Ungleichgewicht in der Stichprobengröße der Untersuchungsgruppe „Lehrgang mit IR-Kamera (LmIR)“

Bei der Betrachtung des in Tabelle 39 dargestellten Untersuchungsplans fällt auf, dass der Stichprobenumfang der Gruppe „*Lehrgang mit IR-Kamera*“ (ohne mediendidaktische Einbettung) nur eine Klasse umfasst. Im Gesamtdesign entsteht der Eindruck einer nicht balancierten Zusammensetzung der Untersuchungsgruppen. Grundsätzlich sollten für Studien oder Untersuchungen die gleichen Zellhäufigkeiten verwendet werden, da dadurch einerseits die Anwendungsvoraussetzungen für parametrische Analysemethoden nicht gefährdet werden und andererseits die Vergleichbarkeit gefördert wird (Hussy et al., 2013).

Werden jedoch die Versuchspläne der Studie **EmIR und EmIR+** (vgl. Tabelle 9 und Tabelle 16) betrachtet, verfügt jede Studie für sich über einen solchen **balancierten Versuchsplan**.

Für die Zusammenführung der Studien im gemeinsamen Versuchsplan bedeutet dies jedoch, dass die geringere Stichprobengröße der Gruppe LmIR bei der Interpretation der Datenanalyse berücksichtigt werden muss. Unterschiedlich große Stichproben können zu Verletzungen der Voraussetzungen parametrischer Testverfahren führen. Da in der vorliegenden Arbeit voraussetzungsfreie Verfahren verwendet werden, ist dies zwar nicht problematisch, jedoch erhöht sich durch unterschiedlich große Stichproben generell das Risiko von Fehlentscheidungen bzgl. der Signifikanz von Gruppenunterschieden. Aus diesem Grund können im Mehrgruppenvergleich nur Hinweise bezüglich dieser Gruppe gewonnen werden.

Zur Erhöhung der Aussagekraft der Ergebnisse des Mehrgruppenvergleichs unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Gruppe LmIR hätte die Datenbasis dieser Gruppe im Rahmen von EmIR+ ebenfalls erhöht werden können. Jedoch wurde in dieser Gruppe die IR-Kamera im Rahmen der Vergleichsstudie EmIR aus methodischen Gründen so eingesetzt, dass eine Gleichheit der Lerngelegenheiten gewährleistet werden konnte. In dieser Gruppe erhielten die Schülerinnen und Schüler, wie die anderen Lehrgangsguppen auch, eine Einführung in die IR-Kamera. Im weiteren Verlauf des Lehrgangs wurde die IR-Kamera beim Experimentieren zur zusätzlichen Visualisierung der thermischen Prozesse eingesetzt, jedoch fand keine weitere Thematisierung des aufgenommenen IR-Bildmaterials oder eine gemeinsame Interpretation der Bilder statt.

Eine selbstständige Bedeutungszuweisung des Bildmaterials als Evidenz für Prozesse wie Wärmeleitung oder Energieentwertung gelingt Schülerinnen und Schülern jedoch häufig nicht (Haglund, Hedberg et al., 2015). Generell muss Wissen bzw. müssen die angestrebten

Erkenntnisse methodisch aufbereitet werden, damit die gewünschten Lernprozesse angeregt werden können (Kerres, 2013). Mit Blick auf den Einsatz der IR-Kamera innerhalb von Lehr-Lern-Prozessen bedeutet dies, dass die Kamera nicht von selbst Wissen über Energieentwertungsprozesse zum Lernenden transportiert. Dies macht eine methodische Aufbereitung der Bildinhalte erforderlich, die den Lernprozess hinsichtlich der Zielsetzung der Verständniseentwicklung im Bereich von Energieentwertung anregt. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs der Gruppe „*Lehrgang mit IR-Kamera*“ scheint vor diesem Hintergrund unplausibel und hätte rein methodische Gründe. Aus diesem Grund wurde in Rahmen von EmIR+ eine mediendidaktische Einbettung der IR-Kamera vorgenommen und auf eine Erhöhung der Stichprobe der LmIR Gruppe verzichtet. Darüber hinaus ist seitens der Lehrpersonen mit geringer Bereitschaft für das Unterrichten in der Gruppe ohne Einbettung zu rechnen, da eine „künstliche“ Lernumgebung vorliegt, in der das gewonnene Bildmaterial nicht berücksichtigt werden darf. Allerdings liefert die Gruppe „*Lehrgang mit IR-Kamera*“ wichtige Informationen, wie Maßnahmen zur mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang umgesetzt werden können, die zu einer Bedeutungszuweisung als Evidenz für Energieentwertung führen.

Lehrpersonvariable

In der vorliegenden Studie wurden die zehn untersuchten Klassen von insgesamt sechs verschiedenen Lehrpersonen unterrichtet (vgl. Tabelle 42).

Tabelle 42: Übersicht über die Lehrpersonen. Bei der mit einem * gekennzeichneten Lehrperson handelt es sich um die Autorin.

Gruppe	traditioneller Energieunterricht	Lehrgang ohne IR-Kamera		Lehrgang mit IR-Kamera	Lehrgang mit IR-Kamera+	
Anzahl der Lehrpersonen	3	1*	1	1*	1*	1
Anzahl der Klassen	Je 1	2	1	1	2	1

Dabei wird von einer grundlegenden Vergleichbarkeit aller teilnehmenden Lehrpersonen ausgegangen. Für eine Vergleichbarkeit spricht, dass alle Lehrpersonen in der zweiten Phase der Lehramtsausbildung nach aktuellem pädagogischem Ansatz ausgebildet wurden. Dies spiegelt sich u. a. in der großen Übereinstimmung der ausgewählten Experimente wider. Darüber hinaus arbeiten die Lehrpersonen bereits über viele Jahre kooperativ zusammen. Diese Einschätzung wird durch den Mehrgruppenvergleich der Ergebnisse des Energietests gestützt, bei dem zwischen den Klassen einer Untersuchungsgruppe zum Zeitpunkt T2⁷⁰ keine signifikanten

⁷⁰ Dies gilt ebenfalls für den Pretest (T0).

Unterschiede feststellbar sind. Darüber hinaus liegen auch im Whilettest (T1) in den Lehrgangsgruppen keine Gruppenunterschiede vor.

Trotz der grundsätzlichen Vergleichbarkeit der Lernprozessgestaltung der teilnehmenden Lehrpersonen muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass die Einstellungen und pädagogischen Ansätze Einfluss auf den Lernerfolg haben (Burde, 2018; Theyßen, 2014). Aus diesem Grund wurden die Lehrgangsgruppen teilweise von derselben Lehrperson unterrichtet. Für nachfolgende Studien ist zu empfehlen, dass in jeder Gruppe dieselben Lehrpersonen unterrichten, um die Vergleichbarkeit nochmals zu erhöhen.

9.3 Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Lehrgang entwickelt, der das Verständnis für Energieentwertung fördert. In der Fachdidaktik gilt ein Verständnis für Energieentwertung häufig als notwendig bzw. grundlegend für den Erwerb eines angemessenen Verständnisses für Energieerhaltung (Duit, 2014; Millar, 2005; Schlichting, 2000). Es liegt daher die Vermutung nahe, dass ein gesteigertes Verständnis für Energieentwertung zu einem gesteigerten Verständnis für Energieerhaltung führt. In der vorliegenden Studie konnte ein positiver Einfluss des Lehrgangs auf das Verständnis für Energieerhaltung nachgewiesen werden, der durch die Visualisierung der Prozesse mittels IR-Kamera nochmals gesteigert werden konnte. Auch konnte in den Untersuchungsgruppen eine Korrelation der Aspekte Entwertung und Erhaltung nachgewiesen werden, in den Lehrgangsgruppen mit starkem Effekt. Jedoch ist hier keine Aussage über Kausalität möglich. Auch wenn eine Untersuchung des Einflusses des Verständnisses für Energieentwertung auf das Verständnis für Energieerhaltung nicht Ziel der vorliegenden Arbeit war, scheint die Frage nach dem Zusammenhang zwischen dem Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung bedeutsam. Eine weiterführende Fragestellung könnte lauten:

- *Inwiefern beeinflusst das Verständnis für Energieentwertung das Verständnis für Erhaltung?*

In dieser Arbeit wurde das digitale Medium IR-Kamera innerhalb des entwickelten Lehrgangs mit dem Ziel eingesetzt, durch die Visualisierung thermischer Prozesse in Form von Bild sowie Videomaterial das Verständnis für Energieentwertung zu unterstützen. In diesem Zusammenhang soll das IR-Bildmaterial Evidenz für Entwertungsprozesse liefern. Aus diesem Grund scheinen Überlegungen darüber, wie Lernende Informationen aus Bildern und Videos aufnehmen und verarbeiten, wichtig.

Für die bewusste Verarbeitung von Informationen hat das Arbeitsgedächtnis eine zentrale Bedeutung (Girwidz, 2009). Allerdings ist sowohl die Speicherkapazität sowie die Speicherdauer des Arbeitsgedächtnisses begrenzt. Damit Informationen ins Langzeitgedächtnis übertragen werden können, müssen bestimmte Prozesse im Arbeitsgedächtnis ablaufen (Kerres, 2018, vgl. Kapitel 3.3). Damit gelernt werden kann, müssen diese Prozesse angeregt und die Grenzen der Kapazität beachtet werden. Hierfür muss unter anderem Wissen mit Vorwissen verknüpft werden. Die Vorgänge werden in der Theorie der kognitiven Beanspruchung (cognitive load) beschrieben (Sweller, 2010). Sweller (2010) unterscheidet dabei drei Arten der Beanspruchung: Die aufgabeninduzierte Beanspruchung, die Beanspruchung durch den Lernprozess sowie die sachfremde Belastung.

Für das Lernen mit IR-Bildmaterial stellt sich daher zunächst die Frage nach der tatsächlichen kognitiven Belastung des Arbeitsgedächtnisses:

- *Welche kognitive Belastung erfahren die Lernenden durch den Einsatz von IR-Bildmaterial?*

Bei der Aufbereitung von Lernmaterial ist darauf zu achten, dass das Arbeitsgedächtnis angemessen ausgelastet sein muss. Bildhafte Darstellungen werden von Lernenden mit geringem Vorwissen eher behalten, wenn sich diese auf das Wesentliche konzentrieren (Kerres, 2018). Jedoch bringen IR-Bilder eine Fülle von Informationen mit sich, die nicht alle gleichermaßen relevant für den Lernprozess sind. Schülerinnen und Schüler müssen zunächst einmal die für sie wichtigen Informationen im Bild bzw. Video identifizieren. Das belastet das Arbeitsgedächtnis unnötig (Kerres, 2018).

Um die Verarbeitung der Informationen zu unterstützen, kann ein Lernmedium im Vorfeld so aufbereitet werden, dass die Aufmerksamkeit auf wichtige Informationen gelenkt wird, beispielsweise durch das Einfügen von Pfeilen (Girwidz, 2009; Kerres, 2018).

Eine Erweiterung der obigen Frage nach der kognitiven Belastung durch den Einsatz könnte daher lauten:

- *Inwiefern kann das Einfügen von Zusatzinformationen in IR-Bilder die kognitive Belastung sowie den Lernerfolg beeinflussen?*

Schülerinnen und Schüler werden auch außerhalb des entwickelten Lehrgangs zunehmend mit IR-Bildmaterial konfrontiert. Beispielsweise lassen sich in vielen Schulbüchern IR-Bilder finden (bspw. Carmesin, Kahle, Konrad, Trumme & Witte, 2016). Um jedoch die gewünschten bzw.

beabsichtigten Informationen den Bildern entnehmen zu können, müssen Schülerinnen und Schüler über bestimmte Kompetenzen verfügen, die es zunächst zu identifizieren und zu strukturieren gilt. In diesem Zusammenhang könnte in einer zukünftigen Forschungsarbeit ein *Strukturmodell der IR-Bildmaterial-Lesekompetenz* entwickelt werden.

Abkürzungsverzeichnis

bspw	<i>beispielsweise</i>
EmIR	<i>Energieentwertung mit der Infrarotkamera - Studie zur Untersuchung des Einflusses einer Infrarotkamera auf das Verständnis für Energieentwertung und -erhaltung in einem curriculumorientierten Lehrgang mit Fokus auf Transfer</i>
EmIR+	<i>Studie zur Untersuchung des Lernerfolgs des entwickelten Lehrgangs und der mediendidaktischen Einbettung der IR-Kamera in den Lehrgang</i>
IR-Bild	<i>Infrarotbild</i>
IR-Kamera	<i>Infrarotkamera</i>
KFT	<i>Kognitiver Fähigkeitstest</i>
LmIR	<i>Untersuchungsgruppe "Lehrgang mit Verwendung der Infrarotkamera"</i>
LmIR+	<i>Untersuchungsgruppe "Lehrgang mit Verwendung der Infrarotkamera + mediendidaktische Einbettung"</i>
LoIR	<i>Untersuchungsgruppe "Lehrgang ohne Verwendung der Infrarotkamera"</i>
nds.	<i>niedersächsischen</i>
POE	<i>Predict-Observe-Explain-Ansatz</i>
tE	<i>Untersuchungsgruppe "traditioneller Energieunterricht"</i>

Literaturverzeichnis

- Asghar, A., Libarkin, J. C. & Crockett, C. D. (2001). *Invisible Misconceptions: Student understanding of Ultraviolet and Infrared Radiation*, Boston, Massachusetts. Zugriff am 29.01.2020. Verfügbar unter https://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract_26065.htm
- Baden-Württemberg Ministerium für Kultur, Jugend und Sport (Hrsg.). (2016). *Bildungsplan des Gymnasiums Physik*. Bildungsplan für das Gymnasium.
- Behle, J. & Wilhelm, T. (2017). Aktuelle Schülerrahmenkonzepte zur Energie. In H. Groetzebauch (Hrsg.), *PhyDid B - Didaktik der Physik. Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (S. 99–107). Internetzeitschrift. Zugriff am 2.5.18. Verfügbar unter <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/780/922>
- Black, P. & Solomon, J. (1983). Life world and science world: Pupils' ideas about energy. In G. Marx (Hrsg.), *Entropy in the school: Proceedings of the 6th Danube seminar on physics education* (S. 43–55). Budapest: Roland Eotvos Physical Society.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler* (4. Aufl.). Heidelberg: Springer.
- Boyes, E. & Stainisstreet, M. (1990). Pupils' ideas concerning energy sources. *International Journal of Science Education*, 12(4), 513–529.
- Boysen, G., Fösel, A., Heise, H., Heepmann, H., Kopte, U., Lichtenberger, J., Schepers, H. et al. (2015). *Fokus Physik. Gymnasium 7-10* (1.). Berlin: Cornelsen.
- Bühner, M. (2006). *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (2. Aufl.). München: Pearson Studium.
- Burde, J. P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 256). Berlin: Logos Verlag.
- Carmesin, H., Kahle, J., Konrad, U., Trumme, T. & Witte, L. (2016). *Universum 7/8. Niedersächsisches Gymnasium* (1. Auflage). Berlin: Cornelsen.
- Chabalengula, V. M., Sanders, M. & Mumba, F. (2012). Diagnosing students' understanding of energy and its related concepts in biological context. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 10(2), 241–266.
- Chen, R. F., Eisenkraft, A., Fortus, D., Krajcik, J., Neumann, K., Nordine, J. et al. (Hrsg.). (2014). *Teaching and Learning of Energy*. Schweiz: Springer International Publishing.
- Clark, R. E. (1994). Media will never influence learning. *Educational Technology: Research & Development*, 42(2), 21–29.
- Clough, E. & Driver, R. (1985). Secondary Students' conception of the conduction of heat: bringing together scientific and personal views. *Physics Education*, 20, 176–182.
- Crossley, A., Hirn, N. & Starauschek, E. (Hrsg.). (2009). *Schülervorstellungen zur Energie. Eine Replikationsstudie*. In: V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.), Tagungsband-CD DPG – Bochum 2009, Didaktik der Physik. Berlin: Lehmanns Media.

- Crossley, A. & Starauschek, E. (2010). Schülerassoziationen zur Energie. Ergebnisse auf Kategorien-ebene. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1–5.
- Daane, A. R., McKagan, S. B., Vokos, S. & Scherr, R. E. (2015). Energy conservation in dissipative processes: Teacher expectations and strategies associated with imperceptible thermal energy. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(1):010109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.010109>
- Dexter, A., Chiesa, L. & Xie, C. (2012). *Using Infrared Thermography to Visualize the Invisible: Investigation Heat Transfer* (QIRT, Hrsg.). 11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography. Zugriff am 29.01.2020. Verfügbar unter <https://www.ndt.net/article/qirt2012/papers/QIRT-2012-280.pdf>
- Driver, R. & Millar, R. (1986). *Energy matters*. Leeds: Center for Science and Mathematics Education, University of Leeds.
- Driver, R. & Warrington, L. (1985). Students' use of the principle of energy conservation in problem situations. *Physics Education*, 20(4), 171–176. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/20/4/308>
- Duit, R. (Hrsg.). (1986a). *Der Energiebegriff im Physikunterricht*. Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.
- Duit, R. (1986b). Energievorstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 34(13), 106–109.
- Duit, R. (1987). Should Energy be introduced as something quasi-material? *International Journal of Science Education*, 2(9), 139–145.
- Duit, R. (1991). Zur Elementarisierung des Energiebegriffs. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 2(6), 12–19.
- Duit, R. (1992). Atomische Vorstellungen bei Schülern. In H. Fischler (Hrsg.), *Quantenphysik in der Schule* (Bd. 133, S. 201–214). Kiel: IPN / Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität. Zugriff am 29.01.2020.
- Duit, R. (1995). Vorstellungen und Lernen von Physik und Chemie. Zu den Ursachen vieler Lernschwierigkeiten. *PLUS LUCIS*, 2(2/95), 11–18. Zugriff am 20.03.2019. Verfügbar unter https://www.pluslucis.org/ZeitschriftenArchiv/1995-2_PL.pdf
- Duit, R. (2004). Energievorstellungen. aus: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie 34* (1996), Heft 13, S. 7-9. In R. Müller, R. Wodzinski & M. Hopf (Hrsg.), *Schülervorstellungen in der Physik. Festschrift für Hartmut Wiesner* (S. 189–191). Köln: Aulis Verlag Deubner.
- Duit, R. (Duit, R., Hrsg.). (2010). *piko Brief Nr. 1. Schülervorstellungen und Lernen von Physik*, IPN. piko Briefe, Physik im Kontext. Zugriff am 10.03.2019. Verfügbar unter <https://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf>
- Duit, R. (2012). *Teaching and Learning the Physics Energy Concept*. Zugriff am 12.05.2018. Verfügbar unter <http://esummit-msu.net/content/teaching-and-learning-physics-energy-concept>
- Duit, R. (2014). Teaching and Learning the Physics Energy Concept. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine et al. (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy* (S. 67–85). Schweiz: Springer International Publishing.

- 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* (S. 185–200). Bristol: Falmer Press.
- Ebersbach, U. (2004). *Emission von Wärmestrahlung*, HTWK-Leipzig. Zugriff am 30.11.2019. Verfügbar unter <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~ebersb/bauphysik/lehrblatt/lehrblatt2.pdf>
- Englisch, M., Ewert-Altenhain, D., Klein, M., Lemper, P., Scholl, C. et al. (Scherbaum, S., Rudolf, M. & Bergmann, B., Hrsg.). (2015). *Mehrfaktorielle Versuchspläne*, TU Dresden. E-Learning-Modul zur Versuchsplanung und -durchführung in der Psychologie. Zugriff am 13.6.19. Verfügbar unter https://versuch.file2.wcms.tu-dresden.de/w/index.php/Mehrfaktorielle_Versuchspläne
- Erickson, G. L. (1979). Children's conceptions of heat and temperature. *Science Education*, 62(2), 221–230. <https://doi.org/10.1002/sce.3730630210>
- Fehlow, F. (2016). *Weiterentwicklung und Evaluation eines Lehrgangs zur Energieentwertung unter dem Einsatz des Messinstruments Sensor Tag*. Masterarbeit. Leibniz Universität, Hannover.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B. & Sands, M. (1963). *The Feynman lectures on physics* (1. Aufl.). Menlo Park: Addison Wesley.
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (2004). Teilchen und Atome. Modellbildung im Unterricht. In R. Müller, R. Wodzinski & M. Hopf (Hrsg.), *Schülervorstellungen in der Physik. Festschrift für Hartmut Wiesner* (S. 218–222). Köln: Aulis Verlag Deubner.
- FLIR Systems (Hrsg.). (2017). *Flir One*. Zugriff am 05.04.2017. Verfügbar unter <http://www.flir.de/flirone/ios/>
- Fortus, D. (2016). Conservation of Energy. In J. Nordine (Hrsg.), *Teaching energy across the sciences, K-12* (S. 105–123). Arlington Virginia: NSTA Press National Science Teachers Association.
- Fortus, D., Kubsch, M., Bielik, T., Krajcik, J., Lehavi, Y., Neumann, K. et al. (2019). Systems, transfer, and fields: Evaluating a new approach to energy instruction. *Journal of research in science teaching*, 56(10), 1341–1361. <https://doi.org/10.1002/tea.21556>
- Fortus, D., Sutherland Adams, L. M., Krajcik, J. & Reiser, B. (2015). Assessing the role of curriculum coherence in student learning about energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(10), 1408–1425. <https://doi.org/10.1002/tea.21261>
- Behörde für Schule und Berufsbildung, Landesinstitut für Lehrerbildung und Schulentwicklung (Mitarbeiter) (Freie Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung, Hrsg.). (2011). *Bildungsplan Gymnasium Sekundarstufe I. Physik*, Behörde für Schule und Berufsbildung.
- Friege, G., Scholz, R. & Oberholz, H.-W. (2018). Darstellungen energetischer Prozesse. Physikalische Vorgänge mit dem Energiekontomodell, Energieflussdiagrammen und Energieübertragungsketten beschreiben. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 25(164), 33–38.
- Girwidz, R. (2009). Medien im Physikunterricht. In R. Girwidz, P. Häußler & E. Kircher (Hrsg.), *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (2. Aufl., S. 203–261). Berlin: Springer.
- Greinert, L. & Weßnigk, S. (2017). Infrarotkameras zur Erweiterung der Sinneswahrnehmung Sehen. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze & J. Groß (Hrsg.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen. Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (S. 161–176). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.

- Greinert, L. & Weißnigk, S. (2019). Energieentwertung mit der IR-Kamera – Studie zum Einfluss der IR-Kamera auf das Energieverständnis in einem curriculumorientierten Lehrgang mit Fokus auf Energietransfer. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10(2), 245–257. <https://doi.org/10.1007/s40573-019-00102-w>
- Greinert, L. & Weißnigk, S. (2020, im Druck). Unsichtbares sichtbar machen! Interpretation von Wärmebildern mit Hilfe eines WBK-Führerscheins. *Digital Unterrichten Biologie*, (1), 8–9.
- Hadinek, D., Weißnigk, S. & Neumann, K. (2018). Energie (be-)greifbar machen. Das Würfelmodell im Unterricht zum Thema Energie. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 25(164), 20–23.
- Haglund, J., Hedberg, D. & Schönborn, K. J. (2015). Thermal cameras in school laboratory activities. *Physic Education*, 50(4), 424–430.
- Haglund, J., Jeppsson, F., Hedberg, D. & Schönborn, K. J. (2015). Students' framing of laboratory exercises using infrared cameras. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2), 1–22. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020127>
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2005). *Physik* (1. korrigierter Nachdruck, 1 Band). Weinheim: WILEY-VCH GmbH & Co KG aA.
- Hardy, I., Kleickmann, T., Koerber, S., Mayer, D., Möller, K., Pollmeier, J. et al. (2010). Die Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz im Grundschulalter. Projekt Science-P. In E. Klieme (Hrsg.), *Zeitschrift für Pädagogik* (S. 115–125). Weinheim: Beltz Juventa.
- Harrison, A. G., Grayson, D.J. & Treagust, D. F. (1999). Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of research in science teaching*, 36(1), 55–87.
- Hartig, K. (2014). *Der Einfluss der Präsentationsgeschwindigkeit auf das Wahrnehmen und Verstehen beim Lernen mit einer Animation*. Dissertation. Universität Koblenz-Landau.
- Heller, K. A. & Perleth, C. (Hrsg.). (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4.-12. Klassen. Revision (KFT 4-12+ R)*. Göttingen: Hogrefe.
- Hollandt, J. (Bodenschatz, E., Bleyer, U., Fischer, A. & Heiland, M., Hrsg.). (2009). *Infrarotstrahlung*, DPG Deutsche Physikalische Gesellschaft; Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Welt der Physik. Zugriff am 17.02.19. Verfügbar unter <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/elektromagnetisches-spektrum/infrarotstrahlung/>
- Höpel, I. (2008). Bildkompetenz als pädagogische Schlüsselkompetenz. Forschungsstand und Perspektiven einer interdisziplinären Bilddidaktik. In G. Lieber (Hrsg.), *Lehren und Lernen mit Bildern. Handbuch zur Bilddidaktik* (S. 60–71). Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren.
- Hoppe, T. (2018). *Interpretation von Erkenntnisgewinnung aus Wärmebildern*. Masterarbeit. Leibniz Universität, Hannover.
- Hussy, W., Schreier, M. & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34362-9>
- Jenelten-Allkofer, C. & Duit, R. (1980). Entwicklung des Energiebegriffs bei 5-bis 16jährigen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 12, 408–413.

- Karstädt, D., Möllmann, K.-P., Pinno, F. & Vollmer, M. (1998). Sehen im Infrarot – Grundlagen und Anwendungen der Thermographie. *Physik in unserer Zeit*, 29(1), 6–15. <https://doi.org/10.1002/piuz.19980290103>
- Kerres, M. (2003). Wirkungen und Wirksamkeit neuer Medien in der Bildung. In M. Nelting (Hrsg.), *Hyperakusis* (S. 1–12). Stuttgart: Georg Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/b-0034-6780>
- Kerres, M. (2013). *Mediendidaktik. Konzeption und Entwicklung mediengestützter Lernangebote* (4., überarb. und aktualisierte Aufl.). München: Oldenbourg.
- Kerres, M. (2018). *Mediendidaktik. Konzeption und Entwicklung digitaler Lernangebote*. Berlin: De Gruyter.
- Kesidou, S. & Duit, R. (1993). Students' Conceptions of the Second Law of Thermodynamics. An Interpretive Study. *Journal of research in science teaching*, 30(1).
- Kircher, E. (2009). Modellbegriff und Modellbildung in der Physikdidaktik. In R. Girwidz, P. Häußler & E. Kircher (Hrsg.), *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (2. Aufl., S. 735–762). Berlin: Springer.
- Kleefeld, S. & Bohrmann-Linde, C. (2019). Die Wärmebildkamera im naturwissenschaftlichen Unterricht. *MNU Journal*, 72(3), 209–216.
- Kleickmann, T., Hardy, I., Pollmeier, J. & Möller, K. (2011). Zur Struktur naturwissenschaftlichen Wissens von Grundschulkindern. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 43(4), 200–212.
- KMK. (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004* (Beschlüsse der Kultusministerkonferenz). München: Luchterhand. Zugriff am 29.01.2020. Verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf
- KMK, Schmitz, A. (Mitarbeiter) (Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, Hrsg.). (2019). *Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz, Kultusministerkonferenz*. Zugriff am 10.2.19. Verfügbar unter <https://www.kmk.org/themen/qualitaetssicherung-in-schulen/bildungsstandards.html>
- Köhn, K. (2019). *Der IR-Experimentierführerschein als mediendidaktische Einbettung für den Physikunterricht in der Mittelstufe*. Bachelorarbeit. Leibniz Universität, Hannover.
- Kollar, I. (2012). *Die Satellitenbild-Lesekompetenz. Empirische Überprüfung eines theoriegeleiteten Kompetenzstrukturmodells für das "Lesen" von Satellitenbildern*. Dissertation. Pädagogische Hochschule Heidelberg, Heidelberg.
- Köller, O., Schnabel, K. U. & Baumert, J. (2000). Der Einfluss der Leistungsstärke von Schulen auf das fachspezifische Selbstkonzept der Begabung und das Interesse. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 32(2), 70–80.
- Krapp, A. (1992). Das Interessenskonstrukt - Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus Sicht einer Person-Gegenstands-Konzeption. In A. Krapp & M. Prenzel (Hrsg.), *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze der pädagogisch-psychologischen Interessenforschung* (Bd. 26, S. 297–329). Münster: Aschendorff.
- Kriks, S. (2016). *Untersuchung zum Verständnis für Energieentwertung mit Hilfe von Wärmebildkameras*. Masterarbeit. Leibniz Universität, Hannover.

- Kröger, J. (2012). *Entwicklung von Experimenten zur Einführung der Energieentwertung und Energieerhaltung im Physikunterricht der Mittelstufe*. Masterarbeit. IPN - Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Kiel.
- Krüger, D., Parchmann, I. & Schecker, H. (Hrsg.). (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (1. Aufl.). Berlin: Springer.
- Kubsch, M., Nordine, J. & Neumann, K. (2018). Der System Transfer Ansatz. Den Energietransfer zwischen Systemen ins Zentrum stellen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 29(164), 24–28.
- Kultusministerkonferenz. (2015). *Kerncurriculum für das Gymnasium. Schuljahrgänge 5-10*, Niedersächsisches Kultusministerium. Zugriff am 02.07.2018. Verfügbar unter <http://www.cuvo.nibis.de>
- Lange, F. de, Heilbron, M. & Kok, P. (2018). How Do Expectations Shape Perception. *Cell Press Reviews, Trends in Cognitive Sciences*, 22(9), 764–779.
- Leisen, J. (2011). Unterrichtsmethoden. In H. Schecker & M. Hopf (Hrsg.), *Physikdidaktik kompakt* (S. 88–92). Köln: Aulis Verlag Deubner.
- Lindner, K. (2014). *Erfassung des Verständnisses von Energie im Rahmen einer Interviewstudie*. Masterarbeit. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Liu, X. & McKeough, A. (2005). Developmental growth in students' concept of energy: Analysis of selected items from the TIMSS database. *Journal of research in science teaching*, 42(5), 493–517. <https://doi.org/10.1002/tea.20060>
- Lüders, K. & Oppen, G. von. (2008). *Mechanik, Akustik und Wärme. Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 1* (12. Aufl.). Berlin, New York: De Gruyter.
- Ludwig, G. (1979). *Einführung in die Grundlagen der theoretischen Physik*. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- Mayring, P. (2000). Qualitative Inhaltsanalyse. *Forum Qualitative Sozialforschung [Online Journal]*, (1(2)). Zugriff am 22.05.2018. Verfügbar unter <http://www.qualitative-research.net/index.php/fqs/article/view/1089/2383>
- Mehler, D., Edelsbrunner, P. & Matić. (2019). Appreciating the Significance of Non-Significant Findings in Psychology. *Journal of European Psychology Students*, 10(4), 1–7.
- Meiringer, M. (2013). *Schülervorstellungen zur Infrarotkamera und deren Aufnahmen*. Diplomarbeit. Universität Wien, Wien.
- Melander, E., Haglund, J., Weiszflog, M. & Andersson, S. (2016). More than Meets the Eye – Infrared Cameras in Open-Ended University Thermodynamics Labs. *The Physics Teacher*, 54(9), 528–531. <https://doi.org/10.1119/1.4967889>
- Meschede, D. (H.). (2002). *Gerthsen Physik* (21. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Michel, H. (2018). *Nature of Science im Fachkontext Physik*. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Michel, H. & Neumann, I. (2016). Nature of Science and Science Content Learning. *Science & Education*, 25(9-10), 951–975. <https://doi.org/10.1007/s11191-016-9860-4>
- Millar, R. (2005). *Teaching about energy*. Research Paper 2005/11. University of York, York. Zugriff am 10.08.2017. Verfügbar unter www.york.ac.uk/education/research/research-paper

- Ministerium für Bildung Sachsen-Anhalt (Hrsg.). (2016). *Fachlehrplan Gymnasium. Physik*. Zugriff am 12.02.2019. Verfügbar unter https://www.bildung-lsa.de/lehrplaene___rahmenrichtlinien/gymnasium/physik/schuljahrgaenge_7_8.html
- Ministerium für Bildung und Kultur Saarland (Hrsg.). (2013). *Lehrplan Physik. Gymnasium, Klassenstufen 7 und 8*. Zugriff am 22.01.2020. Verfügbar unter https://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/LP_Ph_Gym_7_und_8_Mai_2013.pdf
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, Rheinland-Pfalz (Hrsg.). (2014). *Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz. Biologie, Chemie, Physik, Klassenstufen 7 bis 9/10*. Zugriff am 10.02.2019. Verfügbar unter https://ors.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/ors.bildung-rp.de/Faecher/Naturwissenschaften/NW-Lehrplaene_Endversion_online.pdf
- Ministerium für Schule und Weiterbildung, NRW. (2008). *Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe 1 in Nordrhein-Westfalen. Physik* (1. Auflage), Ministerium für Schule und Weiterbildung, NRW. Zugriff am 02.07.2018. Verfügbar unter <https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplannavigator-s-i/gymnasium-g8/index.html>
- Möllmann, K.-P. & Vollmer, M. (2000). Eine etwas andere, physikalische Sehweise. Visualisierung von Energieumwandlungen und Strahlungsphysik für die (Hochschul-)lehre. *Physik Journal*, 56(9), 65–69. <https://doi.org/10.1002/phbl.20000560915>
- Möllmann, K.-P. & Vollmer, M. (2007). Infrared thermal imaging as a tool in university physics education. *European Journal of Physics*, 28(3), 37–50. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/28/3/S04>
- Molz, A., Kuhn, J. & Wilhelm, T. (2016). Das Unsichtbare sichtbar machen: Smartphones als Wärmebildkamera. *Physik in unserer Zeit, Magazin*, 47(5), 255–256.
- Müller, M. G. (2003). *Grundlagen der visuellen Kommunikation. Theorieansätze und Analysemethoden* (Bd. 2414). Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft; Reihe: UTB/M.
- Müllges, K. (2000). Medizintechnik: Tumor im Wärmebild. *Deutsches Ärzteblatt*, 97(47). Zugriff am 12.01.20. Verfügbar unter <https://www.aerzteblatt.de/archiv/25212/Medizintechnik-Tumor-im-Waermebild>
- National Research Council. (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, D.C.: The National Academies Press; National Academies Press.
- Neumann, K. (2018). Energieverständnis entwickeln. Physikalische Erkenntnisse und Implikationen für die Unterrichtspraxis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 29(164), 7–9.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J. & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of research in science teaching*, 50(2), 162–188. <https://doi.org/10.1002/tea.21061>
- Neumann, K., Viering, T. & Fischer, H. (2010). Die Entwicklung physikalischer Kompetenz am Beispiel des Energiekonzepts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 26, 285–298.
- Neumann, S. & Hopf, M. (2011). Was verbinden Schüler mit dem Begriff ‚Strahlung‘? *Zeitschrift fuer Didaktik der Naturwissenschaften*, 17, 157–176.
- Neumann, S. & Hopf, M. (2012). Student's Conceptions About "Radiation": Results from an Explorative Interview Study of 9th Grade Students. *Journal of Science Education and Technology*, 21, 826–834.

- NGSS Lead States. (2013). *Next Generation Science Standards: For States, By States*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Niedersächsisches Landesinstitut für schulische Qualitätsentwicklung (Niedersächsischer Bildungsserver, Hrsg.). (2019). *Curriculare Vorgaben. Kerncurricula, Rahmenrichtlinien und Curriculare Vorgaben in Niedersachsen*, Niedersächsisches Landesinstitut für schulische Qualitätsentwicklung. Zugriff am 10.2.19. Verfügbar unter <http://www.nibis.de/nibis.php?menid=203>
- Nordine, J. (2016). Talking about energy. In J. Nordine (Hrsg.), *Teaching energy across the sciences, K-12* (S. 61–78). Arlington Virginia: NSTA Press National Science Teachers Association.
- Nordine, J. & Weißnigk, S. (2016). Exposing Hidden Energy Transfers with Inexpensive Thermal Imaging Cameras. *Science Scope*, 25–32.
- Nordmeier, V., Strahl, A., Kirstein, J. & Müller, R. (2008). Spannende Versuche mit der Wärmebildkamera. *Praxis der Naturwissenschaften*, 57(8), 15–20.
- Oberholz, H.-W. (Hrsg.). (2015). *Dorn Bader Physik. Band 7/8 Gymnasium Niedersachsen*. Braunschweig: Schroedel.
- 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(5), 691–715. <https://doi.org/10.1007/s11165-014-9444-8>
- Plano-Clark, V., Huddleston-Casas, C. A., Churchill, S., O'Neil Green, D. & Garrett, A. L. (2008). Mixed Methods Approaches in Family Science Research. *Journal of Family Issues*, 29(11), 1543–1566. <https://doi.org/10.1177/0192513X08318251>
- Plassmann, A. A. & Schmitt, G. (2007). *Lern-Psychologie. Methoden der empirischen Forschung*. Zugriff am 02.07.2018. Verfügbar unter <http://www.lern-psychologie.de>
- Reinhold, P. (1996). *Offenes Experimentieren und Physiklernen*. Kiel: IPN.
- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based-Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 33(1), 52–69.
- Rhöneck, C. von. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. *Naturwissenschaften im Unterricht*, 34(13), 10–14.
- Rhöneck, C. von & Duit, R. (1978). Empirische Daten zur Entwicklung des Energiebegriffs. *Der Physikunterricht*, 12(2), 59–71.
- Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.). (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>
- Scherr, R. E., Harrer, B. W., Close, H. G., Daane, A. R., DeWater, L. S., Robertson, A. D. et al. (2016). Energy tracking diagrams. *The Physics Teacher*, 54, 96–102.
- Schlichting, H. J. (1991). Zwischen common sense und physikalischer Theorie. Wissenschaftliche Probleme beim Physiklernen. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 74(44/2), 1–8.
- Schlichting, H. J. (2000). Energieentwertung. Ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 2(49), 2–6.
- Schlichting, H. J. & Backhaus, U. (1987). Energieentwertung und der Antrieb von Vorgängen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 35(24), 15–20.

- Schnotz, W. (2005). Integrated Model of Text and Picture Comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 49–69). Cambridge University Press.
- Schnotz, W. (2014). Integrated Model of Text and Picture Comprehension. In R. Mayer & R. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 72–103). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.006>
- Schönborn, K. J., Haglund, J. & Xie, C. (2014). Pupils' Early Explorations of Thermoimaging to Interpret Heat and Temperature. *Journal of Baltic Science Education*, 13(1), 118–132.
- Schwarze, H. (2018). Wo ist die potenzielle Energie. In T. Wilhelm (Hrsg.), *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen zu fachgerechten Elementarisierungen* (1., S. 31–33). Seelze: Aulis Verlag in Friedrich Verlag GmbH.
- Short, D. B. (2012). Thermal imaging in the science classroom. *The school science review*, 346(94), 75–78.
- Solomon, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, (20), 165–170.
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung Bayern (Hrsg.). (2004). *Lehrplan für das Gymnasium in Bayern. Physik*. Zugriff am 02.07.2018. Verfügbar unter <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26382>
- Sweller, J. (2010). Element Interactivity and Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 22, 123–138.
- Tatar, E. & Oktay, M. (2007). Students' Misunderstandings about the Energy Conservation Principle: A General View to Studies in Literature. *International Journal of Environmental & Science Education*, 2(3), 79–81.
- Theyßen, H. (2014). Methodik von Vergleichsstudien zur Wirkung von Unterrichtsmedien. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (1. Aufl., S. 67–79). Berlin: Springer.
- Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (Hrsg.). (2012). *Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Physik*. Zugriff am 10.02.2019. Verfügbar unter <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2280>
- Tipler P.A. & Mosca G. (2015). Energie und Arbeit. In J. Wagner (Hrsg.), *Physik. für Wissenschaftler und Ingenieure* (7.). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Titz (Bodenschatz, E. (D.), Bleyer, U. (D.), Fischer, A. (B.) & Heiland, M.(B.), Hrsg.). (2013). *Entropie. Phänomene der Thermodynamik*, Deutsche Physikalische Gesellschaft; Bundesministerium für Bildung und Forschung. Welt der Physik. Zugriff am 8.2.19. Verfügbar unter <https://www.weltderphysik.de/thema/phaenomene-der-thermodynamik/entropie/>
- Ulrich, N., Schwiter, J. & Schanze, S. (2014). Das digitale Schulbuch als Lernbegleiter. In J. Maxton-Küchenmeister & J. Meßinger-Koppelt (Hrsg.), *Digitale Medien im Naturwissenschaftlichen Unterricht* (S. 75–82). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.
- Van Heuvelen, A. & Zou, X. (2001). Multiple representations of work-energy processes. *American Journal of Physics*, 69(2), 184–194. <https://doi.org/10.1119/1.1286662>

- Viering, T. (2012). *Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 138). Berlin: Logos Verlag.
- Vogl, S. (2017). Quantifizierung. *KZfSS Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 69(S2), 287–312. <https://doi.org/10.1007/s11577-017-0461-2>
- Vollmer, M. & Möllmann, K.-P. (2010a). *Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications*: Wiley.
- Vollmer, M. & Möllmann, K.-P. (2010b). *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Vollmer, M., Möllmann, K.-P., Pinno, F. & Karstädt, D. (2001). There is more to see than eyes can detect. Visualization of energy transfer processes and the laws of radiation for physics education. *The Physics Teacher*, 39(6), 371–376. <https://doi.org/10.1119/1.1407135>
- Von Aufschnaiter, C. (2014). Laborstudien zur Untersuchung von Lernprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (1. Aufl.). Berlin: Springer.
- Wagner, E. (2010). Mit Bildern lernen – in Bildern denken. In P. Bodensteiner, E. Pöppel & E. Wagner (Hrsg.), *Wissensgenese an Schulen. Beiträge einer Bilddidaktik* (Bd. 2, Sonderausgabe, Bd. 2, S. 43–54). München: Hanns-Seidel-Stiftung e.V, Hausdruckerei.
- Watts, M. (1983). *A study of alternative frameworks in school science*. Dissertation. University of Surrey, Surrey.
- Weichsel, Y., Strahl, A. & Müller, R. (2008). Die Wärmebildkamera in der Elektrizitätslehre. *Pädagogik der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 57(8), 21–25.
- Weidenmann, B. (2007). Bilder in Lernprozessen: mehr wert als tausend Worte? In J. Zumbach & H. Mandl (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie in Theorie und Praxis* (S. 149–155). Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG.
- Wernecke, U. (2017). *Förderung konzeptuellen Wissens über Energie durch den Einsatz von Repräsentationen*. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Wernecke, U., Schwanewedel, J. & Harms, U. (2018). Metaphors describing energy transfer through ecosystems. Helpful or misleading? *Science Education*, 102(1), 178–194. <https://doi.org/10.1002/sce.21316>
- Weßnigk, S. (2018). Energieerhaltung und -entwertung. Ein wichtiges, aber schwieriges Thema in Naturwissenschaft und Gesellschaft. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 29(164), 2–5.
- Weßnigk, S. & Neumann, K. (2014). Warum hören Bewegungen nicht auf? Ein an Alltagsvorstellungen orientierter Einstieg in den Themenkomplex Energie. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 25(139), 16–21.
- Weßnigk, S. & Neumann, K. (2015). Understanding Energy. An exploration of the relationship between measures of students' understanding of energy, general cognitive abilities and schooling. *Science Education Review Letters (SERL)*, 7–15.

- Weßnigk, S. & Nordine, J. (2017). Die Bedeutung von Unterrichtslehrgängen für die Entwicklung von Kompetenz. Empirischer Beleg für die Wichtigkeit von Lehrgangsentwicklung sowie ein Beispiel für einen Lehrgang zur Energieentwertung. *PLUS LUCIS*, (1), 40–45.
- White, R. T. & Gunstone, R. F. (1992). *Probing Understanding*. Great Britain: Falmer Press.
- Wilhelm, T. & Hopf, M. (2014). Design-Forschung. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (1. Aufl., S. 31–42). Berlin: Springer.
- Wilhelm, T. & Schecker, H. (2018). Strategien für den Umgang mit Schülervorstellungen. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 40–61). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Winkel, J., Fichten, W. & Großmann, K. (2017). Erhebungsmethoden. In Zentrum für Lehrerinnen- und Lehrerbildung Europa Universität Flensburg (Hrsg.), *Forschendes Lernen an der Europa-Universität Flensburg. Schriften zur Professionalisierung im Rahmen einer phasenübergreifenden Lehrerinnen- und Lehrerbildung* (S. 95–110). Flensburg.
- Wirtz, M. & Kutschmann, M. (2007). Analyse der Beurteilerübereinstimmung für kategoriale Daten mittels Cohens Kappa und alternativer Masse. *Die Rehabilitation* [Analyzing interrater agreement for categorical data using Cohen's kappa and alternative coefficients], 46(6), 370–377. <https://doi.org/10.1055/s-2007-976535>
- Xie, C. (2011). Visualizing Chemistry With Infrared Imaging. *Journal of Chemical Education*, (88), 881–885.
- Xie, C. (2012a). *Frequently Asked Questions* (The Concord Consortium USA, Hrsg.). Zugriff am 20.02.19. Verfügbar unter <http://energy.concord.org/ir/faq.html>
- Xie, C. (2012b). *Transforming science Education with IR Imaging* (The Concord Consortium USA, Hrsg.). USA. Zugriff am 20.04.17. Verfügbar unter <http://energy.concord.org/ir/>
- Xie, C. & Hazzard, E. (2011). Infrared Imaging for Inquiry-Based-Learning. *The Physics Teacher*, 49(6), 368–372.
- Yeo, S. & Zadnik, M. (2001). Introductory thermal concept evaluation: assessing students' understanding. *The Physics Teacher*, (39), 496–504.

Anhang

A. Konzeption des Lehrgang <i>Energieentwertung mit Fokus auf Transfer</i>	234
A.1. Temperatur als Messgröße (1. DS)	235
A.2. Einführung in das digitale Messinstrument IR-Kamera (1. DS).....	236
A.3. Einführung in Energieformen und Quellen (2. DS)	238
A.4. Warum kommen manche Bewegungen scheinbar von allein zum Stehen, während andere weiterlaufen? (2. DS).....	239
A.5. Bewegungsenergie (3. DS).....	240
A.6. Höhenenergie (4. DS)	242
A.7. Einführung in die Energieumwandlung (5. DS).....	243
A.8. Mechanische und nicht-mechanische Energieumwandlungen (6. DS)	245
A.9. Energieübertragungsketten Teil 1 (7. DS)	246
A.10. Energieübertragungsketten Teil 2 (8. DS)	247
A.11. Energieentwertung bei Umwandlungsprozessen (9. DS)	249
A.12. Energieentwertung bei Energieübertragungsketten Teil 1 (10. DS).....	251
A.13. Energieentwertung bei Energieübertragungsketten Teil 2 (11. DS).....	252
A.14. Energieentwertung und Temperatur im Teilchenmodell (12. DS)	253
A.15. Energieentwertung im Fokus (13. DS)	255
A.16. Energieerhaltung über Energieentwertung (14. DS)	257
B. Mediendidaktische Einbettung: angepasster Unterrichtsgang	259
B.1. Mechanische und nicht-mechanische Energieumwandlungen (6. DS).....	259
B.2. Energietransfer (7. und 8. DS)	259
B.3. Energieentwertung bei Umwandlungsprozessen (9. DS).....	260
B.4. Energieentwertung bei Energieübertragungsketten Teil 1 und 2 (10. und 11. DS).....	261
B.5. Doppelstunde: Energieentwertung und -erhaltung (12. – 14. DS)	262
C. Testinstrumente	263
C.1. Energietest adaptiert von Michel (2018)	263
C.2. Fachspezifisches Interesse adaptiert nach Köller et al. (2000).....	275
C.3. Interviewaufgaben und Leitfaden.....	275
C.3.1. Interviewaufgaben adaptiert nach Lindner (2014).....	275
C.3.2. Interviewleitfaden adaptiert nach Lindner (2014)	278
D. Ergänzende Auswertungen der Energietest- und Interviewdaten	279
D.1. Qualitative Auswertung der Interviews für den Aspekt Erhaltung	279
D.1.1. Erhaltung LoIR und LmIR	279

D.1.2. Erhaltung tE und LoIR.....	288
D.2. Übersicht: Analyse der Energietestdaten über die Messzeitpunkte T0, T1 und T2 für Entwertung und Erhaltung der Gruppen LoIR und LmIR+	294
E. Übersicht: Aspekte der Energiequadriga in den Lehrplänen der Bundesländer	295
Danksagung.....	296
Eidesstattliche Erklärung.....	297
Lebenslauf.....	298

A. Konzeption des Lehrgang *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer*

Die Darstellung der Unterrichtsstunden des Lehrgangs ist durch die Aspekte *Zielsetzung*, *Handlungsschwerpunkt* und *didaktisch- methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs* strukturiert, die im Folgenden näher erläutert werden.

Zielsetzung In diesem Rahmen erfolgt eine operationalisierte Formulierung des Stundenziels unter Berücksichtigung der inhaltsbezogenen bzw. prozessbezogenen Kompetenzen des nds. Kerncurriculums (vgl. Kapitel 2.3 sowie Kultusministerkonferenz, 2015).

Handlungsschwerpunkt Der Handlungsschwerpunkt beschreibt die zentrale Lernhandlung, mit dessen Hilfe die Schülerinnen und Schüler das Stundenziel erreichen sollen. Dabei wird in der vorliegenden Arbeit unter dem Begriff Lernhandlung die aktive, kognitive Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand verstanden. Aus diesem Grund sind Zielsetzung und Handlungsschwerpunkt eng miteinander verzahnt und bedingen sich gegenseitig.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Die Konzeption der Unterrichtsstunden basiert zum einen auf dem in Kapitel 5 dargestellten Überlegungen sowie zum anderen auf der Expertise der Autorin als Gymnasiallehrerin⁷¹. Die Beschreibung des Unterrichtsgangs soll die zentralen Entscheidungen begründen, entspricht jedoch nicht vollständig dem Charakter eines Unterrichtsentwurfs. Daher wird nicht zwischen didaktischen und methodischen Entscheidungen unterschieden. Trotzdem gehen die Überlegungen über eine rein deskriptive Darstellung der Stunden hinaus, da die Kenntnis wichtiger Impulse, antizipierter Schüleräußerungen sowie notwendigen Steuerungsverhaltens für Lehrpersonen das Ziel der geplanten Lernschritte konkretisieren und so eine selbstständige Durchführung des Lehrgangs erleichtern kann. Zudem kann diese Darstellung Orientierung innerhalb des didaktischen Konzepts *Energieentwertung mit Fokus auf Transfer* bieten. Dabei sind die getroffenen Aussagen⁷² nicht als allgemeingültig anzusehen, sondern sollen vielmehr einen Leitfaden der Lernweggestaltung speziell für diesen Lehrgang darstellen.

⁷¹ Die Autorin ist seit Anfang 2012 als Gymnasiallehrerin an der Ricarda-Huch-Schule in Hannover in den Fächern Physik und Mathematik tätig.

⁷² Gemeint sind Aussagen wie „an dieser Stelle ist es notwendig“ oder „hier müssen Erklärungen eingefordert werden“, die als Leitfaden interpretiert werden und nicht als allgemeingültig gesehen werden sollen. Daher wird kein Literaturbezug hergestellt.

A.1. Temperatur als Messgröße (1. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- definieren die Temperatur als Messgröße
- können mittels der Messinstrumente analoges Thermometer, digitales Thermometer und IR-Thermometer die Temperatur von verschiedenen Objekten bestimmen.

Handlungsschwerpunkt Selbstständige Messung von Objekttemperaturen mittels verschiedener Messinstrumente.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Die Einführung in die Stunde bildet ein traditionelles Schülerdemonstrationsexperiment, bei dem ein*e Lernende*r seine Hände jeweils in ein Gefäß mit heißem bzw. kaltem Wasser taucht. Die*der Lernende wird aufgefordert die Empfindungen zu beschreiben, um diese ebenfalls der Klasse zugänglich zu machen. In einem nächsten Schritt wird die*der Lernende dazu aufgefordert die Hände gleichzeitig in ein Gefäß mit lauwarmem Wasser zu halten und erneut die Beobachtungen zu beschreiben. Mögliche Beschreibungen sind: „*die rechte Hand fühlt sich jetzt kalt an und die linke warm*“ oder „*die Hände fühlen sich unterschiedlich warm an*“. Das Experiment kann mit dem Ziel die Beobachtungen zu bestätigen mit weiteren Lernenden erneut durchgeführt werden. Aus diesen Beobachtungen heraus ergibt sich für die Lernenden die Frage nach der tatsächlichen Temperatur des Wassers im mittleren Gefäß. Die Lernenden können bereits erste Vermutungen über die Wassertemperatur äußern. Dabei begründen sie die unterschiedlichen Empfindungen über das vorangestellte Tauchen der Hände in heißes bzw. kaltes Wasser und vergleichen dies beispielsweise mit eigenen lebensweltlichen Erfahrungen aus dem Schwimmbad oder der Badewanne. Um die Temperatur des Wassers zu ermitteln, muss eine objektive Temperaturmessung stattfinden. Hierfür nennen die Schülerinnen und Schüler zunächst das Thermometer als geeignetes Messinstrument und geben in diesem Zusammenhang verschiedene Thermometerarten an. Das analoge und das digitale Thermometer sollte den Schülerinnen und Schülern bereits aus dem Alltag in Form von Bratthermometern bzw. Wetterstationen bekannt sein. Ebenfalls kennen viele Schülerinnen und Schüler bereits die berührungslose Messung mittels IR-Thermometer beispielsweise bei der Fiebermessung. Allerdings ist davon auszugehen, dass sie keine Unterscheidung bzgl. der Messtechnik über IR-Strahlung gegenüber der Kontaktmessung vornehmen können. Diese Unterscheidung muss von der Lehrperson vorgenommen werden. Mittels Digitalthermometer wird die Wassertemperatur in den

drei Gefäßen aus dem Demonstrationsexperiment gemessen und die aufgestellten Vermutungen bestätigt oder verworfen. An dieser Stelle sollte nochmals die Notwendigkeit einer objektiven Messung hervorgehoben und die Temperatur als Messgröße herausgestellt werden.

Unter der Fragestellung, wie sich die Temperatur von Objekten mittels verschiedener Thermometerarten bestimmen lässt, führen die Schülerinnen und Schüler Messungen mit allen drei Thermometern durch. In diesem Rahmen messen die Lernenden die Temperaturerhöhung von Knete durch Verformung, die Mischtemperatur von Flüssigkeiten sowie die Temperatur von Gegenständen verschiedener Materialien bei Raumtemperatur. Hierbei lernen die Schülerinnen und Schüler die Delta-Schreibweise für Temperaturdifferenzen sowie das Formelzeichen und die Einheit der Temperatur kennen.

Der Schwerpunkt bei der Auswertung der Messergebnisse liegt mit Bezug auf die Leitfrage auf den Erfahrungen, die die Lernenden während der Messungen gemacht haben, sowie auf besonderen Auffälligkeiten bei der Messung. Dabei kann es sich beispielsweise um Beobachtungen handeln, dass die Temperatur nicht an jeder Messstelle gleich ist. In diesem Zusammenhang kann ebenfalls der Begriff der Oberflächentemperatur geklärt werden.

A.2. Einführung in das digitale Messinstrument IR-Kamera (1. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- führen Temperaturmessungen mit Hilfe einer IR-Kamera durch.
- interpretieren die Farbcodierung der IR-Bilder im Hinblick auf die Temperatur.

Handlungsschwerpunkt Selbstständige Messungen mittels IR-Kamera und Aufnahme eigener IR-Bilder sowie IR-Videos.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Als Einführung sollen die Lernenden zunächst das IR-Bild des Hundes beschreiben. Denkbar sind hier Äußerungen wie „*das ist das Wärmebild eines Hundes*“ oder „*die Nase des Hundes ist kalt*“. Dabei ist anzumerken, dass die Schülerinnen und Schüler eher den Begriff Wärmebild bzw. Wärmebildkamera verwenden. Da es an dieser Stelle zunächst um das Aktivieren von Vorerfahrungen geht, erfolgt die präzisierende Begriffseinführung der IR-Kamera erst zu einem späteren Zeitpunkt. In diesem Zusammenhang soll eine Zuordnung der Farben zu hohen bzw. niedrigen Temperaturen stattfinden und so das IR-Bild in Hinblick auf die Temperatur gedeutet werden. Die Impulse „Schätzt die Temperatur der Nase des Hundes“ oder „Gebt die Temperatur des Hundebauchs

an“ soll die Schülerinnen und Schüler zu Überlegungen über die Skalierung des Bildes nach der höchsten und niedrigsten Temperatur im Beobachtungsbereich führen. Erfahrungsgemäß geben viele Lernende an dieser Stelle eine Schätzung der Nasentemperatur von $T=0^{\circ}\text{C}$ bzw. eine Bauchtemperatur von $T=100^{\circ}\text{C}$ an. Die Impulse sind geeignet, um über die Skalierung des Bildes nach der höchsten und niedrigsten Temperatur im Beobachtungsbereich zu klären. Die automatische Farbskalierung des Bildes muss an dieser Stelle thematisiert werden.

IR-Bilder sind vielen Schülerinnen und Schülern aus Polizeiserien, Feuerwehreinsätzen oder auch aus Büchern, darunter auch Schulbücher, bekannt. Um die Vorkenntnisse der Lernenden zu aktivieren kann als vertiefender Impuls nach weiteren Kontexten gefragt werden, in denen ihnen bereits IR-Bilder begegnet sind. Hier erfolgt eine kurze Einführung in die Messtechnik mittels IR-Strahlung sowie die Begriffseinführung als „IR-Kamera“.

Unter der Fragestellung, was mittels einer IR-Kamera sichtbar gemacht werden kann, untersuchen die Lernenden den Klassenraum mit Hilfe der IR-Kamera. Dabei liegt der Fokus auf Entdeckungen, die mit bloßem Auge nicht erkennbar wären. Dabei handelt es sich beispielsweise um verdeckte Heizungsrohre oder Leitungen oder die eigenen Fußspuren auf dem Boden. In diesem Rahmen werden die Lernenden immer wieder dazu aufgefordert die gemachten IR-Aufnahmen hinsichtlich der Temperatur zu interpretieren. Um die IR-Kamera mit der Rolle eines Messinstrumentes zur Temperaturbestimmung zu verknüpfen, sollen die Lernenden ebenfalls die Temperatur von Wasser mittels Digitalthermometer und IR-Kamera bestimmen und die Messwerte miteinander vergleichen. Für eine intensive Auseinandersetzung mit der IR-Kamera erkunden die Lernenden die Einstellungen der Kamera-App und beschreiben dessen Auswirkungen auf das IR-Bild.

Mit Rückbezug auf die Leitfrage, was mit Hilfe der IR-Kamera sichtbar gemacht werden kann, schildern die Schülerinnen und Schüler ihre Beobachtungen und nennen Auffälligkeiten. Hierbei kann es sich z.B. um die Beobachtung handeln, dass mit der IR-Kamera das eigene Spiegelbild im Whiteboard oder der Klassenraumtür erkennbar ist, obwohl die Spiegelung im sichtbaren Licht nicht wahrnehmbar ist. In diesem Rahmen sollte auch auf Fragen bzgl. der Interpretation bzw. der Funktionsweise der Kamera eingegangen werden.

A.3. Einführung in Energieformen und Quellen (2. DS)

Zielsetzung: Die Schülerinnen und Schüler benennen verschiedene Formen, Quellen und Wandler von Energie.

Handlungsschwerpunkt: Anfertigen einer Mind-Map unter Verwendung vorgegebener Abbildungen von verschiedenen Alltagssituationen und Gegenständen.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Der Begriff Energie begegnet den Lernenden in den Medien, im Elternhaus und im Alltagssprachgebrauch. Nach Duit (2010) soll im Unterricht an Vorerfahrungen angeknüpft werden. Aus diesem Grund ist zunächst eine Aktivierung dieser Kenntnisse und Erfahrungen notwendig. Hierfür erhalten die Schülerinnen und Schüler 16 verschiedene Abbildungen, auf denen unter anderem ein Müsliriegel, eine brennende Kerze, ein IR-Bild einer Häuserfront oder ein Ball auf einem Tisch dargestellt sind, die sie unter der Fragestellung „*Was verstehst du unter dem Begriff Energie*“ betrachten sollen. Dabei werden die Abbildungen vorgegeben, um den Schülerinnen und Schülern einen Gesprächsanlass zu bieten und im Rahmen des anschließenden Informationsaustausches eine gemeinsame Gesprächsgrundlage zu schaffen. Zur Aktivierung des Vorwissens werden die Lernenden zunächst aufgefordert drei Karten auszuwählen, die für sie Beispiele für Energie darstellen. Zusätzlich haben die Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit für sie prägnante Situationen oder Gegenstände zu ergänzen. In Anlehnung an den Assoziationstest von Duit (1986a) sollen die Schülerinnen und Schüler Sätze formulieren, in denen sie das Wort Energie im Alltag verwenden und auch einen Satz zu einer von ihnen gewählten Karte formulieren. Abschließend werden die Schülerinnen und Schüler dazu aufgefordert die Karten für sie sinnvoll zu ordnen und ggf. Überschriften zu finden. Der anschließende Informationsaustausch findet auf Grundlage dieser Mind-Maps statt.

Ausgehend von den Präsentationen der Mind-Maps werden die Begriffe Energieform und Energiequelle eingeführt. Ebenfalls kann hier im Zusammenhang von Solaranlagen oder Windrädern von einer beabsichtigten Veränderung der Energieform gesprochen werden. Mit Blick auf die Zielsetzung der Unterrichtsreihe sollte an dieser Stelle der Zusammenhang zwischen dem IR-Bild und Temperatur herausgestellt werden und bereits eine Verknüpfung zur inneren Energie erfolgen.

A.4. Warum kommen manche Bewegungen scheinbar von allein zum Stehen, während andere weiterlaufen? (2. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler erklären das Andauern von Bewegungen durch das Hinzufügen von Wasser, Kerze und Batterie.

Handlungsschwerpunkt Die Schülerinnen und Schüler vergleichen zwei identische Bewegungen hinsichtlich ihrer Dauer.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Die Vorstellung, dass Energie verbraucht werden kann, ist weit verbreitet (vgl. Kapitel 2.4.1.1). Daher ist anzunehmen, dass die Schülerinnen und Schüler den Begriff Verbrauch bei ihren Erläuterungen im Zusammenhang mit Energie verwenden. Ziel der folgenden Schülerexperimente ist es, diese gefestigten Alltagserfahrungen durch die gezielte Manipulation von Vorgängen bewusst zu machen und daraus eine Notwendigkeit abzuleiten, diese zu hinterfragen. Hierfür wurden vier Vorgänge jeweils mit und ohne externe Energiequelle betrachtet: ein „Schluckspecht“, eine Lichtwippe, ein magisches Pendel und ein Magic Kreisel. Alle diese Vorgänge haben gemeinsam, dass sie ohne das Hinzufügen von beispielsweise einem Teelicht bei der Lichtwippe, sofort zum Stillstand kommen, während sich die Lichtwippe mit Teelicht selbstständig weiterbewegt. Während einige Vorgänge sich bereits optisch unterscheiden, ist beispielsweise beim magischen Pendel und beim Magic Kreisel der Unterschied nicht so leicht erkennbar, da die Batterien im Aufbau verborgen sind. Diese Vorgänge sollen bei den Schülerinnen und Schülern einen Konflikt mit ihren Alltagserfahrungen hervorrufen und die Frage nach der Ursache für die ungewöhnliche Dauer der Bewegungen aufwerfen. Die Schülerinnen und Schüler werden dazu aufgefordert, die beiden zunächst identisch erscheinenden Vorgänge miteinander zu vergleichen und Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede zu benennen. Die Methode des arbeitsteiligen Experimentierens macht einen Informationsaustausch notwendig. Aus diesem Grund präsentieren die Lernenden ihr jeweiliges Experiment und erläutern ihre Beobachtungen. Unterstützend kann hier der Impuls: *„Beschreibe, was hat sich beim zweiten Vorgang gegenüber dem ersten Vorgang geändert hat“* gewählt werden, der bereits auf das Hinzufügen von Elementen hinweist. Erst unter Kenntnis aller Erfahrungen sind die Lernenden in der Lage als Gemeinsamkeit herauszustellen, dass ein Vorgang *„schnell zum Stillstand kommt“*, während sich der andere weiterbewegt. Aus dieser Beobachtung wird die Leitfrage der Reihe *„Warum kommen manche Bewegungen scheinbar von allein zum Stehen, während andere weiterlaufen?“* abgeleitet. Die

Schülerinnen und Schüler sollen an dieser Stelle bereits Vermutungen äußern und das Wasser, das Teelicht bzw. die Batterie als Ursache für das Fortlaufen des Vorgangs benennen. Dabei steht die phänomenologische Betrachtung der Vorgänge im Vordergrund und nicht die Erklärungen für das Weiterlaufen der Bewegungen.

A.5. Bewegungsenergie (3. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- können den Einfluss von Masse und Geschwindigkeit auf die Menge an Bewegungsenergie benennen und in Form von „je-desto“- Sätzen beschreiben.
- wählen als Maß für die Menge an Bewegungsenergie das Eindrücken von Knete.

Handlungsschwerpunkt Durchführung eines Experiments zur Untersuchung des Einflusses von Masse und Geschwindigkeit auf die Bewegungsenergie unter Berücksichtigung der Parameterkontrolle.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Im Rahmen des Unterrichtseintritts wird den Schülerinnen und Schüler ein Video gezeigt, welches zwei Crashtests mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zeigt. Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert die Crashtests miteinander zu vergleichen und erhalten erneut die Möglichkeit das Video speziell unter diesem Gesichtspunkt anzusehen. Mögliche Schüleräußerungen sind dabei: „*das eine Auto ist schneller als das andere Auto*“ oder „*beim schnelleren Auto geht mehr kaputt*“. An dieser Stelle muss der Begriff Geschwindigkeit eingeführt werden. Als nächstes sollen die Schülerinnen und Schüler dem Vorgang des Crashtests eine Energieform zuordnen und die Bewegungsenergie identifizieren. Die Lernenden werden dazu aufgefordert, ihre Beobachtungen erneut mittels der Begriffe Geschwindigkeit und Bewegungsenergie zu formulieren. Hierbei können Formulierungen wie „*das Auto mit der größeren Geschwindigkeit hat mehr Bewegungsenergie*“ geäußert werden. An dieser Stelle sollte als Maß für die Energie das Ausmaß der Zerstörung benannt werden. Aus diesen Überlegungen heraus ergibt sich als Leitfrage der Stunde „**Welche Faktoren beeinflussen die Menge der Bewegungsenergie?**“. Die Schülerinnen und Schüler äußern nun weitere Vermutungen, welche Faktoren ebenfalls einen Einfluss auf die Bewegungsenergie haben. Neben der Masse ist ebenfalls eine Nennung von Form und das Material des Wagens möglich. Dies sind richtige Hinweise, die daher bei einem Vergleich konstant gehalten werden müssen. Diese Äußerungen können bereits eine Hinführung zur experimentellen Untersuchung des Einflusses der Faktoren Geschwindigkeit und Masse

darstellen. Im Lernprozess ergibt sich die Notwendigkeit die Vermutungen über den Einfluss der Faktoren experimentell zu untersuchen. Hierfür wird der Crashtest mit einem Fahrbahnwagen, Gewichten, Knete und einem Gummiband simuliert. An dieser Stelle muss herausgestellt werden, dass die Knete wieder zur ursprünglichen Dicke geformt werden muss, um die Durchgänge miteinander vergleichen zu können. Da die Lernenden bis zu diesem Zeitpunkt im Physikunterricht wenig Erfahrung mit halb-quantitativen Messungen haben, ist es notwendig die Parameterkontrolle bei der Messung vorzugeben. Hierbei sollen die Schülerinnen und Schüler zunächst den Einfluss der Geschwindigkeit bei gleicher Masse untersuchen und in einem nächsten Schritt bei konstanter Geschwindigkeit die Eindrücktiefen der Knete bei unterschiedlicher Masse vergleichen. Hierbei stellt es eine Schwierigkeit dar, dass bei größerer Masse das Gummiband stärker gespannt sein muss, um dieselbe Geschwindigkeit zu erreichen. Da es sich um eine halb-quantitative Messung handelt, soll der ermittelte Zusammenhang von den Lernenden in „je-desto“-Form beschrieben werden. Dabei handelt es sich um eine den Schüler bereits aus dem Vorunterricht bekannte Vorstrukturierung.

Um die Leitfrage zu beantworten sollen die Schülerinnen und Schüler die Ergebnisse des Experiments vergleichen. Hierbei können zunächst Formulierungen wie *„Je schneller Wagen fährt, desto mehr wird es eingedrückt“* genannt werden. An dieser Stelle ist es notwendig unter Bezug zur Leitfrage die Aussagen mit den Begriffen Masse, Geschwindigkeit und Bewegungsenergie zu geeigneten Aussagen zur Beantwortung der Leitfrage zu überführen und zu präzisieren. In diesem Rahmen sollte die Notwendigkeit der Methode der Parameterkontrolle von den Lernenden begründet werden.

Als vertiefender Impuls kann hier auf die Rolle des Gummibands eingegangen werden, wobei die Energieübertragung vom Gummiband auf den Wagen beschrieben werden kann.

A.6. Höhenenergie (4. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- können den Einfluss von Masse und Höhe auf die Menge an Höhenenergie benennen und in Form von „je-desto“-Formulierungen beschreiben.
- wählen als Maß für die Menge an Höhenenergie das Eindringen von Knete.

Handlungsschwerpunkt Selbstständige Planung und Durchführung eines Experiments zur Untersuchung des Einflusses von Masse und Höhe auf die Höhenenergie.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Als Stundeneinstieg wird auch hier ein Video gewählt, welches ein Auto zeigt, das über einen Kran in die Höhe gezogen wird und anschließend auf einen Baumstamm fällt. Die Schüler werden aufgefordert das Video zu beschreiben. Dabei wurde eine ähnliche Situation wie in der vorherigen Stunde zur Bewegungsenergie gewählt, da die Schülerinnen und Schüler so die Situation mit dem Vorunterricht verknüpfen und ihr Vorwissen aktivieren können. Aus diesem Grund ist hier anzunehmen, dass die Schülerinnen und Schüler bereits die Höhenenergie in ihren Beschreibungen benennen und als Einflussfaktor die Höhe heranziehen. Aus diesen Überlegungen heraus wird der Leitfrage der Stunde „*Welche Faktoren beeinflussen die Höhenenergie des Wagens?*“ formuliert. Die Schülerinnen und Schüler äußern Vermutungen und benennen als weiteren Einflussfaktor die Masse. Auch hier ist denkbar, dass sie die Form des Stammes, das Material sowie den Auftreffwinkel ansprechen, die bei einer erneuten Durchführung konstant gehalten werden müssen. In Anlehnung an den Vorunterricht erklären die Schülerinnen und Schüler zur Überprüfung der Hypothesen die Notwendigkeit einer experimentellen Untersuchung des Zusammenhangs. Durch die bewusst ähnliche Konzeption der vorliegenden Stunde zur Vorstunde *Bewegungsenergie* sollen die Schülerinnen und Schüler handlungsfähig sein, um die weiteren Schritte selbstständig zu planen und eigenständig auf die notwendige Parameterkontrolle einzugehen.

Vor der Beantwortung der Leitfrage ist zunächst ein Informationsaustausch über die gewählte Vorgehensweise notwendig, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beurteilen zu können. Hierfür erklärt eine Schülergruppe am Demonstrationsexperiment ihr Vorgehen und geht auf wichtige Schritte der Durchführung ein. In diesem Rahmen wird auf abweichende Vorgehensweisen eingegangen und diese auf Zweckmäßigkeit hinsichtlich der Fragestellung geprüft. Der

Einfluss der Höhe bzw. der Masse auf die Höhenenergie wird in „je-desto“-Form vorgenommen und ggf. Präzisierungen hinsichtlich der Begrifflichkeiten eingefordert.

Als Vertiefung können hier verschiedene Massestücke in unterschiedlicher Höhe miteinander verglichen und auf Grundlage der Ergebnisse der Experimentierphase jeweils eine Aussage über die Höhenenergie der Massestücke durch Formulierungen wie „*hat mehr*“ bzw. „*hat weniger Höhenenergie als...*“ getroffen werden⁷³. Ebenfalls eignet sich hier als vertiefende Aufgabe bereits ein Vergleich von Objekten hinsichtlich ihrer Gesamtenergie, also Bewegungs- und Höhenenergie. Hierfür wurde eine Aufgabe mit zwei Flugzeugen in unterschiedlicher Höhe entwickelt. Diese Aufgabe soll verdeutlichen, dass Vorgängen anhand ihrer Indikatoren auch mehrere Energieformen zugeordnet werden können.

A.7. Einführung in die Energieumwandlung (5. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben einen vorgegebenen Vorgang durch einen Energieumwandlungsprozess mit Hilfe des eingeführten Energiekontomodells.
- verwenden hierbei die bekannten Indikatoren und schließen auf Grundlage ihrer Beobachtungen auf die zugehörigen Energieformen.

Handlungsschwerpunkt Anfertigen von Energiekontomodellen

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Den Einstieg bildet ein Demonstrationsexperiment, bei dem ein Wagen eine schiefe Ebene hinauffährt. Der Prozess wird gestoppt, wenn der Wagen den höchsten Punkt erreicht hat. Die Lernenden sollen zunächst ihre Beobachtungen äußern und hierbei auf die Indikatoren Höhe und Geschwindigkeit eingehen. In einem nächsten Schritt sollen die Lernenden der Situation sogenannte Indikatorkarten zuordnen. Diese Karten zeigen Symbole der bisher betrachteten Einflussfaktoren auf die Größe von Höhen- und Bewegungsenergie. Für den Einflussfaktor Höhe zeigen die Indikatorkarten beispielweise unterschiedlich große Lineale, die verschiedene Höhen darstellen oder für den Einflussfaktor Geschwindigkeit ein Tachometer, welches unterschiedliche Geschwindigkeiten

⁷³Diese Formulierung ist fachlich nicht korrekt. Physikalisch gesehen wird die Energie dem Feld zugeordnet. Jedoch wird diese Unterscheidung in der Zuordnung nicht von allen Schülerbüchern vorgenommen. Durch die extreme Massenasymmetrie Erde/Gewicht ist die didaktische Reduktion, die die Höhenenergie dem Gewicht zuordnet, zulässig. Darüber hinaus ist diese Vorstellung leichter zugänglich als die Feldvorstellung (Millar, 2014).

anzeigt⁷⁴. Die Schülerinnen und Schüler sollen ihre Zuordnung in der Form „*die Geschwindigkeit nimmt ab, während die Höhe zunimmt*“ verbalisieren. Anhand dieser Betrachtungen kann nun auf die Energie bei diesem Vorgang geschlossen werden. Die Lernenden benennen die zu den Indikatoren gehörenden Energieformen und überführen die zuvor getroffene Aussage in die energetische Betrachtung: „Die Menge der Bewegungsenergie nimmt ab, während die Menge der Höhenenergie zunimmt“. An dieser Stelle erfolgt die Begriffseinführung der Energieumwandlung durch die Lehrperson. Die Vorbetrachtung der Indikatoren soll die Unterscheidung zwischen der Beobachtung und der Interpretation des Gesehenen hinsichtlich Energie unterstützen.

In einem nächsten Schritt erfolgt die Einführung des adaptierten Energiekontomodells anhand des gewählten Beispiels sowie der Energiekarten. Nach der Fertigstellung sollen die Lernenden als Gemeinsamkeit der einzelnen Energiesäulen die gleiche Höhe benennen. Dieser Impuls hat das Ziel, die Höhe als wichtiges Element herauszustellen, sollte aber noch nicht auf die Energieerhaltung bezogen werden.

Unter der Fragestellung, welcher Energieumwandlungsprozess beim Fadenpendel stattfindet, beschreiben die Lernenden als Vertiefung den Pendelvorgang aus energetischer Sicht und fertigen auf Grundlage der zugeordneten Indikatoren das zugehörige Energiekontomodell unter Verwendung der Energiekarten an. Dabei betrachten sie ausschließlich die erste Pendelperiode, da so zum einen eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet wird und zum anderen die Abnahme der Pendelperiode nicht in den Vordergrund gerückt wird. Die Kontomodelle werden verglichen und selbstständig Korrekturen vorgenommen.

⁷⁴ Die Indikatorkarten für Temperatur zeigen analoge Thermometer mit unterschiedlich hohen Flüssigkeitssäulen.

A.8. Mechanische und nicht-mechanische Energieumwandlungen (6. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler beschreiben mechanische und nicht mechanische Energieumwandlungen mit Hilfe von Energieumwandlungsprozessen.

Handlungsschwerpunkt Anfertigen von Energiekontomodellen.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Zur Aktivierung des Vorwissens wird als Stundeneinstieg ein Demoexperiment gewählt, bei dem ein Wagen eine schiefe Ebene hinabfährt. Die Schülerinnen und Schüler sollen zunächst Beobachtungen äußern und in einem nächsten Schritt den Vorgang aus energetischer Sicht bis kurz vor dem Erreichen des Bodens beschreiben. Es sind Formulierungen wie „*die Höhenenergie nimmt ab und Bewegungsenergie nimmt zu*“ denkbar. An dieser Stelle sollte herausgestellt werden, dass die beiden Beobachtungen nicht isoliert betrachtet werden können, sondern sich vielmehr gegenseitig bedingen. Dieser Zusammenhang wird durch den Begriff der *Energieumwandlung* verdeutlicht.

Da das Energieumwandlungsprinzip sowie das eingeführte Modell wichtige Elemente des Lehrgangs darstellen, ist es notwendig, dass die Lernenden Vorgänge selbstständig durch Energieumwandlung beschreiben und mittels Kontomodell darstellen können. Unter der Fragestellung, wie sich verschiedene Vorgänge mit Hilfe von Energieumwandlung beschreiben lassen, betrachten die Lernenden verschiedene mechanische sowie nicht-mechanische Vorgänge. Um den Lernenden viele unterschiedliche Erfahrungen zu ermöglichen und diese ihre Wissensbasis in Bezug auf Energieformen sowie die zugehörigen Indikatoren erweitern zu können, wird die Methode des Stationenlernens gewählt. Zur Bearbeitung werden erneut die Modellkarten verwendet, um den Umgang mit diesen zu festigen. Dabei handelt es sich um das Zusammenziehen einer Feder, das Brennen eines Teelichts, drei verschiedene Achterbahnen sowie ein Ballkatapult, mit dem ein Ball senkrecht nach oben geschossen wird.

Für die Ergebnissicherung ist es wichtig, dass die Federhärte bzw. die Ausdehnung als Indikator für Spannenergie und die Temperatur als Indikator für innere Energie herausgestellt werden. Es sollte ein Vergleich der Stationen „Feder“, „Teelicht“ und einer ausgewählten „Achterbahn“ erfolgen. Dabei nimmt das Teelicht als nicht-mechanischer Wandlungsvorgang eine Sonderrolle ein. Zudem wird hier erstmals eine Verknüpfung der Temperatur mit der inneren Energie vorgenommen, auf die im weiteren Verlauf der Reihe zugegriffen werden soll.

Aufgrund der didaktischen Reduktion der Vorgänge durch vorzeitiges Beenden oder Ausschnittsweise Betrachtung kann bei den Schülern die Frage aufkommen, was mit der Energie

passiert, wenn man die Vorgänge bis Prozessende betrachten würde. Diese Frage sollte unter der Reihenleitfrage notiert werden und könnte lauten „Was passiert mit der Energie am Ende des Prozesses?“. Die Lernenden können an dieser Stelle bereits Vermutungen äußern wie „*die Energie wird verbraucht*“, „*die Energie geht woanders hin*“ oder „*die Energie verwandelt sich weiter*“. Diese werden als Vermutungen unter der Frage notiert und können im Laufe der Reihe verworfen oder beibehalten werden. Denkbar ist auch, dass einige Schüler bereits den Erhaltungssatz in der Form „*Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden*“ replizieren können. Über die Bedeutung dieses Satzes können die Schülerinnen und Schüler untereinander diskutieren und ggf. neue Fragen bzw. Vermutungen ableiten. Das Aufwerfen dieser Fragen korrespondiert mit der Grundidee des didaktischen Konzeptes *Entwertung mit Fokus auf Transfer*.

A.9. Energieübertragungsketten Teil 1 (7. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Ablauf von Vorgängen durch Energieübertragungsketten mithilfe von Energieflussdiagrammen.
- unterscheiden zwischen Beobachtung und der Schlussfolgerung hinsichtlich Energie.

Handlungsschwerpunkt Anfertigen von Energieflussdiagrammen

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Zu Beginn der Stunde wird den Schülerinnen und Schülern ein Fadenpendel und ein Newtonpendel präsentiert. Da es sich beim Newtonpendel um ein beliebtes Dekorationsobjekt in Büros handelt, wird der Aufbau und die Funktionsweise einigen Schülerinnen und Schülern schon im Vorfeld bekannt sein. Zur Aktivierung des Vorwissens, sollen die Schülerinnen und Schüler die Vorgänge beim Fadenpendel aus energetischer Sicht beschreiben. In einem zweiten Schritt wird das Newtonpendel ausgelenkt und die Lernenden erneut dazu aufgefordert den Vorgang zu beschreiben. In diesem Rahmen sollte auf eine klare Trennung zwischen Beobachtung und Schlussfolgerung hinsichtlich Energie unterschieden werden. Die Schülerinnen und Schüler beschreiben die Beobachtung, dass die erste Kugel stehen bleibt, während die letzte Kugel in Bewegung gesetzt wird. Aus dieser Beobachtung schließen sie, dass die Energie der ersten Kugel an die letzte Kugel „weitergegeben“ oder „weitergeleitet“ wurde. Dieser Vorgang kann als Energieübertragung bzw. Energietransfer definiert werden. Um den Lernenden die Unterscheidung zwischen Beobachtung und Schlussfolgerung bewusst zu machen, wird in Anlehnung an Oberholz (2015)

als Vorstrukturierung eine Tabelle gewählt, die die Aspekte *Handlung*, *Beobachtung* und *Schlussfolgerung* trennt. Um die Vorgehensweise herauszustellen und die Unterscheidung zu präzisieren wird diese Tabelle für das Newtonpendel gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern ausgefüllt und in diesem Rahmen das Modell *Energieflussdiagramm* eingeführt.

Da der Energieübertragungsgedanke ein wichtiges Grundelement des Lehrgangs darstellt, ist es notwendig, dass die Lernenden Vorgänge selbstständig durch Energietransfer beschreiben und ein Energieflussdiagramm anfertigen. Um den Schülerinnen und Schülern an vielen unterschiedlichen Vorgängen die gemeinsame Erfahrung der Energieübertragung zu ermöglichen, wird hier die Methode des Stationenlernens gewählt. Dabei handelt es sich beispielsweise um gekoppelte Federn, zwei gestapelte Bälle unterschiedlicher Masse, einen Stirlingmotor mit Lampe, ein Gedankenexperiment zum Fahrrad und verschiedene Experimente mit Dynamots.

Das Stationenlernen ist in einem Umfang von zwei Doppelstunden konzipiert, wobei im Rahmen der Ergebnissicherung der ersten Stunde bereits eine Station exemplarisch verglichen werden kann. Dabei eignet sich am besten eines der drei Dynamot-Experimente, da sich diese Übertragungsketten in den wesentlichen Elementen stark ähneln. Bei der Ergebnissicherung ist es wichtig, die Unterscheidung zwischen Beobachtung und energetischer Betrachtung herauszustellen und den Fokus nicht auf etwaige Energieumwandlungsvorgänge, die im Rahmen der Vorgänge stattfinden, zu legen, sondern von einer Übertragung von Energie im Allgemeinen zu sprechen.

A.10. Energieübertragungsketten Teil 2 (8. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler beschreiben mechanische und nicht mechanische Energieübertragungsprozesse mit Hilfe von Energieflussdiagrammen.

Handlungsschwerpunkt Anfertigen von Energieflussdiagrammen.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Den Stundeneinstieg bildet ein Demonstrationsaufbau eines einfachen elektrischen Stromkreises mit einer Glühlampe. Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert, den Vorgang aus energetischer Sicht zu beschreiben und das zugehörige Energieflussdiagramm anzufertigen. Das Flussdiagramm zeigt die Übertragung der Energie von der Spannungsquelle zur Lampe. In einem nächsten Schritt

wird der Stromkreis in Form einer Reihenschaltung⁷⁵ um eine weitere baugleiche Lampe erweitert. Die Schülerinnen und Schüler sollen ihr Energieflussdiagramm geeignet verändern. Dabei ist es denkbar, dass die Schülerinnen und Schüler die zweite Lampe „*hinten*“ die erste Lampe setzen und so eine Übertragung der Energie von der ersten Lampe zur zweiten Lampe darstellen. An dieser Stelle kann auf die Helligkeit der beiden Lampen im Gegensatz zur einzelnen Lampe verwiesen werden. Mit diesen Überlegungen kann eine Korrektur hinsichtlich der Energieübertragung von der Spannungsquelle zu beiden Lampen im Modell vorgenommen werden. Die Überlegungen sollen die Schülerinnen und Schüler bei der Bearbeitung der Experimente innerhalb des Stationenlernens sowie in ihren Flussdiagrammen berücksichtigen. Beispielsweise ist diese Betrachtung bei der Station „*Wärmemotor*“ von Bedeutung. Im Rahmen der Ergebnissicherung erstellen die Gruppen von einer zugelosten Station ein Plakat, welches im Klassenraum ausgestellt wird. Im Rahmen eines Museumsrundgangs erhalten die Schülerinnen und Schüler Gelegenheit die Tabellen und Flussdiagramme mit ihren eigenen Lösungen zu vergleichen. In diesem Zusammenhang sollen die Lernenden eine deutlich von ihrer Lösung abweichende mit einem roten Punkt markieren. Die Plakate mit den meisten roten Punkten sollten hinsichtlich ihrer Unterschiede zu den Schülerlösungen diskutiert und ggf. korrigiert werden. Da die Station „*Wärmemotor*“ das Anfangsphänomen erneut aufgreift, sollte diese Station ebenfalls beleuchtet und ein Bezug zum Einstiegsexperiment hergestellt werden.

⁷⁵ Eine Parallelschaltung ist grundsätzlich auch möglich. Jedoch gibt es hier keinen Unterschied in der Helligkeit der Lampen, da sich hier durch den kleineren Widerstand eine größere Stromstärke und damit auch Energiestromstärke ergibt. Die Einführung von Größen des elektrischen Stromkreises hat im Vorunterricht jedoch noch nicht stattgefunden, weshalb an dieser Stelle die Reihenschaltung gewählt wurde, die eine gezielte Beobachtung ermöglicht.

A.11. Energieentwertung bei Umwandlungsprozessen (9. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- benennen die Temperaturerhöhung in Folge von Reibungsprozessen.
- beschreiben die Auswirkungen dieses Vorgangs auf die Energieumwandlung.
- ziehen die Temperaturerhöhung als Indikator für die Umwandlung von Energie in innere Energie heran.
- schließen aufgrund der Temperaturerhöhung der Reibungspartner auf einen Energietransfer.

Handlungsschwerpunkt Untersuchung verschiedener Umwandlungsprozesse auf die Auswirkungen der Reibung auf die Energieumwandlung. Durchführung von *Zusatzhandlungen*, die eine Beobachtung der Temperaturerhöhung ermöglichen.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Den Unterrichtseinstieg bildet ein bereits im Rahmen von Umwandlungsprozessen (6. Doppelstunde) bekanntes Experiment, bei dem ein Wagen eine schiefe Ebene herabfährt. Zur Aktivierung des Vorwissens sollen die Lernenden zunächst ihre Beobachtungen mit Hilfe der Indikatoren Höhe und Geschwindigkeit beschreiben und auf einen Energieumwandlungsprozess schließen. In diesem Rahmen soll das zugehörige Energiekontomodell (vgl. Kapitel 5.1) erneut angefertigt werden, da dieses die Grundlage für weitere Betrachtungen bildet.

In einem nächsten Schritt wird der Wagen umgedreht, so dass er die Rampe herunterrutscht. Die Lernenden beschreiben erneut ihre Beobachtungen mit Hilfe der gleichen Indikatoren. Dabei stellen sie durch bloßes Hinschauen fest, dass der rutschende Wagen eine geringe Geschwindigkeit erreicht als der rollende. Als Ursache nennen die Lernenden die auftretenden Reibungsvorgänge zwischen Wagendach und Rampe. Aufgrund der geringeren Geschwindigkeit des rutschenden Wagens wird diesem Vorgang eine geringere Bewegungsenergie zugeordnet, so dass scheinbar ein *Teil der Energie fehlt*. Diese Überlegung sollte herausgestellt werden. Durch eine genauere Betrachtung der Auswirkungen der Reibung kann nun auf die Suche nach der „*verlorenen*“ Energie gegangen werden: Die Lernenden werden aufgefordert eine Zusatzhandlung durchzuführen; sie sollen mit einem Radiergummi einige Male über den Tisch zu radieren und danach sowohl den Tisch als auch das Radiergummi befühlen. Dabei stellen sie sowohl eine Temperaturerhöhung des Radiergummis als auch des Tisches fest. Durch die Aufforderung, diese Handlung in Verbindung mit dem Experiment zu bringen, argumentieren die Lernenden hier ebenfalls über eine stattfindende Temperaturerhöhung von

Wagen und Rampe aufgrund von Reibung. An dieser Stelle müssen die Lernenden die Temperatur als Indikator für innere Energie identifizieren und auf eine Energieumwandlung in innere Energie schließen. Mit Blick auf das erstellte Kontomodell besteht die Notwendigkeit der Anpassung des Modells, sodass dieses die neuen Erkenntnisse berücksichtigt. Die Schülerinnen und Schüler nehmen eine solche Anpassung für einen Snapshot vor. Unter Berücksichtigung der Beobachtung, dass beide Reibungspartner eine Temperaturerhöhung aufwiesen, wird eine Modellerweiterung vorgenommen (vgl. Kapitel 5.1).

Unter der Fragestellung, welche Auswirkung Reibungsvorgänge auf die Energieumwandlung haben, sollen die Schülerinnen und Schüler weitere Vorgänge wie beispielsweise das Springen eines Flummis und das Herabgleiten von Blöcken unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten auf der schiefen Ebene untersuchen. In diesem Rahmen beobachten die Lernenden, dass der Flummi nach jedem Bodenkontakt eine geringere Höhe erreicht und somit scheinbar Energie „verliert“. Um die Vorgänge zu verdeutlichen, wird als Zusatzhandlung das Dehnen und Zusammenziehen eines Gummibands betrachtet, wobei nach einigen Dehnungen bei Kontakt an der Oberlippe eine Temperaturerhöhung wahrgenommen werden kann. Diese Beobachtung soll auf die Vorgänge des Experiments bezogen werden.

Im Rahmen der Ergebnissicherung wird die Energieumwandlung beim Flummi sowie der damit verbundene Energietransfer anhand des zugehörigen Kontomodells näher betrachtet und die Temperaturerhöhung als Indikator benannt. In diesem Zusammenhang ziehen die Schülerinnen und Schüler die Zusatzhandlung zur Betrachtung des Vorgangs heran.

An dieser Stelle kann ein Rückbezug auf die Fragestellung⁷⁶, was mit der Energie im Laufe eines Prozesses passiert, stattfinden und evtl. bereits Vermutungen verworfen oder beibehalten werden. Eine abschließende Beantwortung gelingt jedoch noch nicht.

⁷⁶ Dabei handelt es sich um eine Fragestellung, die im Rahmen der 5. und 6. Doppelstunde von den Schülerinnen und Schülern aufgeworfen werden sollte.

A.12. Energieentwertung bei Energieübertragungsketten Teil 1 (10. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- benennen die Temperaturerhöhung in Folge von Reibungsprozessen.
- beschreiben die Auswirkungen dieses Vorgangs auf die Energieübertragungsketten und stellen diese im Energieflussdiagramm dar.

Handlungsschwerpunkt Untersuchung verschiedener Energieübertragungsketten hinsichtlich der Auswirkungen von Reibung auf den Energietransfer.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Den Stundeneinstieg bildet ein Demonstrationsexperiment, wobei ein Dynamot über eine Kurbel eine Glühlampe betreibt. Damit die Schülerinnen und Schüler ihr Vorwissen aktivieren, werden sie aufgefordert ein Flussdiagramm der Energieübertragungskette anzufertigen. Dabei können sie vor dem Hintergrund der letzten Stunde bereits verbal auf auftretende Reibungsvorgänge eingehen, diese jedoch wahrscheinlich noch nicht im Flussdiagramm darstellen. Dies führt zu einer Notwendigkeit der Erweiterung des bisherigen Modells, wobei hier die Umgebung als Kettenglied ergänzt wird. Sollten die Schülerinnen und Schüler nicht selbstständig auf Reibungsvorgänge eingehen, können durch das Sichtfenster die Zahnräder im Inneren des Dynamots betrachtet werden. Ebenfalls ist eine Berührung der Lampe möglich, die eine fühlbare Temperaturerhöhung hervorruft.

Unter der Fragstellung nach der Auswirkung der Reibung auf Energieübertragungsvorgänge sollen die Lernenden verschiedene, ihnen teilweise bereits bekannte, Übertragungsketten neu betrachten und gezielt nach der Übertragung von Energie in die Umgebung suchen. Auch hier bietet sich ein Stationenlernen an, da so viele unterschiedliche Erfahrungen der gleichen Klasse ermöglicht werden. Dabei handelt es sich um den bereits betrachteten Stirlingmotor, einen Handstirlingmotor, gekoppelte Propeller, das Mixen von Honig (vgl. Kriks, 2016) sowie ein Wasserkraftwerk. Alle Stationen bieten eine sinnliche Beobachtungsmöglichkeit, die einen Schluss auf eine Energieübertragung vom System des Vorgangs in die Umgebung zulässt: Beispielsweise ist bei der Station „Propeller“ zu beobachten, dass sich der erste Propeller schneller als der 2. Propeller dreht. Ist der Luftstrom zu gering, bleibt der 2. Propeller ganz stehen, während sich der erste noch dreht. Eine Erklärung der Beobachtung als Folge von Energieentwertung gelingt nur, wenn die Schülerinnen und Schüler ihre Beobachtungen in Verbindung mit dem „Fehlen“ von Energie bringen und somit auf einen Energietransfer schließen. In

diesem Zusammenhang müssen sie als Ursache für den Transfer Reibungsvorgänge wie den Luftwiderstand oder die Aufhängung des Propellers identifizieren.

Bei anderen Stationen sollen Schleifgeräusche Hinweise auf auftretende Reibungsvorgänge geben. Im Rahmen dieser Stunde wird auf Zusatzhandlungen verzichtet, da die Temperaturerhöhung der Reibungspartner im Vorunterricht bereits erfahren wurde. Ggf. können Lernende immer wieder auf diese Erfahrung zurückgreifen.

Als Ergebnissicherung erfolgt die Betrachtung einer ausgewählten Station unter besonderer Berücksichtigung der Darstellung im Modell. An dieser Stelle sollte erneut zwischen Beobachtung und Schlussfolgerung hinsichtlich Energie unterschieden werden.

A.13. Energieentwertung bei Energieübertragungsketten Teil 2 (11. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben bei mechanischen und nicht mechanischen Energieübertragungsprozessen einen Energietransfer in die Umgebung und
- stellen diesen mit Hilfe von Energieflussdiagrammen dar.

Handlungsschwerpunkt Untersuchung verschiedener Vorgänge im Hinblick auf Energieentwertung und Berücksichtigung in den zugehörigen Energieflussdiagrammen.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Als Stundeneinstieg wird den Schülerinnen und Schülern ein Bild einer Energieübertragungskette gezeigt. Im Rahmen eines Gedankenexperiments sollen die Schülerinnen und Schüler den dargestellten Vorgang nach Auslösen der Kette beschreiben und das Energieflussdiagramm des Vorgangs anfertigen. Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler die Ursache für den Energietransfer in die Umgebung erläutern und hierfür gezielt Elemente des Aufbaus benennen. In diesem Rahmen nennen sie auftretende Temperaturerhöhungen in Folge von Reibungsprozessen als Indikator für die Umwandlung von Energie in innere Energie sowie den Energietransfer in die Umgebung.

Diese Überlegungen sollen die Schülerinnen und Schüler bei der Bearbeitung der Experimente innerhalb des Stationenlernens sowie in ihren Flussdiagrammen berücksichtigen.

Für die Ergebnissicherung erstellen die Gruppen von einer zugelosten Station ein Plakat, welches im Klassenraum ausgestellt wird. Hierauf sind das zugehörige Energieflussdiagramm sowie der Versuchsaufbau dargestellt, wobei Bereiche vermehrter Temperaturerhöhung von den Schülerinnen und Schülern rot schraffiert werden. Im Rahmen eines Museumsrundgangs erhalten die Schülerinnen und Schüler Gelegenheit, die Plakate mit ihren eigenen Lösungen

zu vergleichen. Auch hier sollen erneut Plakate mit deutlichen Abweichungen zu ihrer eigenen Lösung mit einem roten Punkt markiert werden. Die Plakate mit den meisten roten Punkten werden hinsichtlich ihrer Unterschiede zu den Schülerlösungen diskutiert und ggf. korrigiert.

A.14. Energieentwertung und Temperatur im Teilchenmodell (12. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- erklären den Temperatenausgleich in der Umgebung mit Hilfe des Teilchenmodells.
- schließen auf einen Energietransfer.
- erläutern den Begriff der Energieentwertung.

Handlungsschwerpunkt Untersuchung des Wärmetransports durch Simulation

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Im Rahmen des Stundeneinstiegs wird mit dem Ziel das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler zu aktivieren die Station „Propeller“ erneut betrachtet. Die Lernenden werden aufgefordert, den Vorgang aus energetischer Sicht zu beschreiben. Dabei gehen sie auf den Energietransfer in die Umgebung ein und nennen als Ursache auftretende Reibungsvorgänge. Hierfür ziehen sie die stattfindende Temperaturerhöhung zur Argumentation heran.

Mit der Fragestellung „**wohin geht die Energie, die in die Umgebung übertragen wurde?**“, wird in dieser Doppelstunde der letzte Schritt der Betrachtung der in der 6. Doppelstunde aufgeworfenen Frage „*was passiert mit der Energie am Ende des Prozesses?*“ nachgegangen. In diesem Zusammenhang äußern die Schülerinnen und Schülern Vermutungen wie „*die Energie löst sich langsam auf*“, „*die Energie wird weiter umgewandelt*“ oder „*die Energie wird weiter übertragen*“.

Um den Schülerinnen und Schülern eine Schlussfolgerung hinsichtlich des Verbleibs der Energie nach der Übertragung zu erlauben, wird ein Experiment durchgeführt, welches geeignete Beobachtungsmöglichkeiten durch Indikatoren bietet. Hierbei handelt es sich um ein Simulationsexperiment, bei dem heißes Wasser in drei unterschiedlich große Becken mit Wasser bei Raumtemperatur gegossen wird. Um den Mischprozess beobachtbar zu machen, wird das heiße Wasser blau eingefärbt. Dabei simulieren die drei unterschiedlich großen Becken einen immer größeren Umgebungsraum. Durch das heiße Wasser wird der in Folge von Reibungsvorgängen temperaturerhöhte Umgebungsnahbereich bzw. temperaturerhöhte Körper simuliert. Im Folgenden untersuchen die Schülerinnen und Schüler die jeweiligen Mischvorgänge und bestimmen die jeweilige Mischtemperatur. Während des Mischvorgangs können die Schülerinnen und Schüler beobachten, dass sich die Farbe ohne äußere Einwirkung im

Wasserbecken verteilt und das Wasser im gesamten Becken eine Mischtemperatur annimmt. Diese ist geringer als die Temperatur des heißen Wassers, jedoch größer als die Temperatur des Wassers auf Raumtemperatur. Je größer das Becken ist, desto geringer ist die Mischtemperatur. Um diese Beobachtungen erklären zu können, lernen die Schülerinnen und Schüler das Teilchenmodell kennen. Im Modell bedeutet die Erhöhung der Temperatur eine Erhöhung der mittleren kinetischen Energie der Teilchen (vgl. Fischler & Lichtfeldt, 2004). Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert mit Hilfe des Modells den Mischvorgang auf Teilchenebene zu beschreiben und anhand dieser Überlegungen das Zustandekommen der Mischtemperatur des Wassers zu erläutern. Die Schülerinnen und Schüler müssen hierfür zunächst erkennen, dass es durch das Zusammenführen des Wassers unterschiedlicher Temperatur im Teilchenmodell zu elastischen Stößen zwischen Teilchen niedriger kinetischer Energie und Teilchen erhöhter kinetischer Energie kommt. In Folge dieser Stöße kann allen Teilchen nach einiger Zeit eine erhöhte mittlere kinetische Energie zugeordnet werden. Diese kann als Mischtemperatur interpretiert werden.

Im Rahmen der Ergebnissicherung wird zunächst die Beobachtung der Temperatur herausgestellt: Je größer das Becken, desto kleiner ist die Mischtemperatur. Diese Beobachtung wird mittels Teilchenmodell erklärt. Um die Leitfrage der Stunde „*wohin geht die Energie, die in die Umgebung übertragen wurde?*“ beantworten zu können, müssen die Vorgänge aus energetischer Sicht betrachtet werden. Hierfür müssen die Schülerinnen und Schülern die Vorgänge auf Teilchenebene als Energietransfer deuten. In diesem Zusammenhang ist es notwendig zu erkennen, dass beim Zusammenstoß der Teilchen untereinander die Bewegungsenergie der Teilchen abnimmt, die die hohe Temperatur repräsentieren, während die Bewegungsenergie der Teilchen, die die niedrige Temperatur repräsentieren, zunimmt. Es wird also Energie von einem Teilchen auf das andere übertragen. Anhand dieser Überlegungen kann die Leitfrage beantwortet werden. Ebenfalls ist ein Rückbezug zur Reihenfrage bzw. zur Frage aus der 6. Doppelstunde möglich; es können Vermutungen verworfen oder beibehalten werden.

In diesem Zusammenhang erfolgt nun abschließend die Einführung des Begriffs Energieentwertung. Hierunter wird die Umwandlung von Energie in innere Energie, der Energietransfer in die Umgebung sowie der unumkehrbare Weitertransport in der Umgebung verstanden. Zur Begriffsklärung kann ein Vergleich mit der Entwertung von Fahrkarten gezogen werden: Nach Fahrtende ist die Fahrkarte zwar noch vorhanden, jedoch nicht mehr für ihren ursprünglichen Verwendungszweck, dem Bahnfahren, zu gebrauchen. Die Schülerinnen und Schüler sollen

diese Überlegung auf Energie beziehen und die Umwandlung bzw. den Transfer als Wertverlust der Energie für den Vorgang beschreiben. Diese Energie führt aber zur (unbeabsichtigten) Erhöhung der inneren Energie der Umgebung.

Die Schülerinnen und Schüler sollen in diesem Zusammenhang ebenfalls erläutern, was vor diesem Hintergrund physikalisch mit dem Alltagsbegriff des *Energieverbrauchs* gemeint ist.

A.15. Energieentwertung im Fokus (13. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- begründen die Abnahme der Amplituden bei periodischen Prozessen in Folge von Reibungsprozessen.
- schließen sie bei vermehrter Reibung auf einen größeren Temperaturanstieg und somit auf einen größeren Anteil an entwerteter Energie.

Handlungsschwerpunkt Untersuchung unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten hinsichtlich der auftretenden Entwertungsvorgänge.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Im Rahmen des Unterrichtseintritts sehen die Schülerinnen und Schüler ein Video, welches ein schaukelndes Kind zeigt. Es ist anzunehmen, dass die Schülerinnen und Schüler beim Schaukeln Erfahrungen gesammelt haben, auf die sie im Folgenden zurückgreifen können. Die Schülerinnen und Schüler sollen den Vorgang zunächst aus energetischer Sicht beschreiben und in diesem Zusammenhang ggf. bereits auf auftretende Entwertungsprozesse eingehen. Zur Unterstützung dieser Betrachtung, sollen die Schülerinnen und Schüler in einem nächsten Schritt erläutern, welche Folge ein passives Schaukeln ohne „*Beinarbeit*“ hätte. Die Lernenden beschreiben die schnelle Abnahme der Schaukelamplitude bis zum Stillstand. Unter der Fragestellung, warum die Schaukel an Höhe verliert, äußern die Lernenden bereits Vermutungen hinsichtlich der Energieentwertung und benennen mögliche Einflussfaktoren.

Zur Untersuchung dieser Vermutungen wird das Schaukeln zweier Pendelkörper gleicher Masse als Demonstrationsexperiment betrachtet. An der Aufhängung des ersten Pendels ist Schmirgelpapier angebracht, während das zweite Pendel an einem wolligen Faden befestigt ist. Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert eine begründete Vorhersage zu treffen, welches Pendel zuerst zum Stillstand kommt. Diese Fragestellung nach der größeren Abnahme soll den Fokus der Betrachtung bewusst auf die Energieentwertung lenken. Die Schülerinnen und Schüler argumentieren in diesem Zusammenhang, dass durch das Schmirgelpapier eine

größere Reibung verursacht wird und daher das Pendel vermutlich schneller zur Ruhe kommt. Die Schülerinnen und Schüler folgern daraus eine größere Temperaturerhöhung und schließen so auf eine vermehrte Energieumwandlung in innere Energie bzw. einen vermehrten Energietransfer in die Umgebung. An dieser Stelle sollte der Begriff der Energieentwertung eingefordert werden. Die Vermutungen werden experimentell geprüft und die schnellere Abnahme bestätigt. In diesem Zusammenhang wird am Energiekontomodell begründet, warum die Ausgangshöhe des Pendels unter Berücksichtigung der Energieentwertung nicht mehr erreicht wird.

Unter der Fragestellung, welche Faktoren die Menge an entwerteter Energie beeinflussen, betrachten die Schülerinnen und Schüler erneut einen periodischen Vorgang; das Skaten auf einer Halfpipe. Dieses wird durch Kugeln simuliert, die in einem Schutzblech hin und her rollen. Die Lernenden untersuchen Kugeln verschiedener Oberflächenstruktur hinsichtlich der auftretenden Entwertungsvorgänge. Hierfür sollen sie zunächst die Höhe als Indikator für die Menge an entwerteter Energie identifizieren und die Abnahme der Höhe nach einer festgelegten Anzahl an Perioden als Maß für die Menge an entwerteter Energie heranziehen.

Im Rahmen der Ergebnissicherung beschreiben die Schülerinnen und Schüler ihre Vorgehensweise und benennen die Kugeln mit der größten Entwertung nach zwei Pendelperioden. Als Ursache nennen sie eine vermehrte Temperaturerhöhung dieser Kugeln.

Vertiefend kann an dieser Stelle bereits diskutiert werden, wie eine geringe Entwertung bei diesen Kugeln erreicht werden könnte. Die Lernenden nennen eine Reduzierung der Reibung zwischen Kugel und Halfpipe. Dieser Impuls ist bereits als Vorbereitung der nächsten Stunde zu sehen.

A.16. Energieerhaltung über Energieentwertung (14. DS)

Zielsetzung Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Energieerhaltungssatz als Gleichbleiben der Energiemenge über den gesamten Umwandlungs- und Übertragungsprozess.
- ziehen den Mengenerhalt zur Vorhersage bei idealisierten Prozessen heran.

Handlungsschwerpunkt Anfertigen von und Vorhersage mit Energiekontomodellen.

Didaktisch-methodische Betrachtung des Unterrichtsgangs Zu Beginn der Stunde wird das Experiment „Kugelhalbpipeline“ als Demonstrationsexperiment erneut durchgeführt und das zugehörige Kontomodell bereitgestellt. Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert, den Vorgang auf Grundlage des Kontomodells aus energetischer Sicht zu beschreiben. In diesem Rahmen gehen die Schülerinnen und Schüler auf die Abnahme der Amplitude in Folge von Reibungsprozessen ein, die Ursache für die vollständige Entwertung der gesamten am Anfang zur Verfügung stehenden Energie genannt werden. Dabei wird die Anfangsmenge durch die Säulenhöhe am Anfang repräsentiert und im Kontomodell nach und nach in die Umgebung „verfolgt“.

Unter der Fragestellung, wie das Experiment verändert werden müsste, damit keine Energieentwertung stattfindet, sollen die Schülerinnen und Schüler die Reibungsfreiheit benennen. Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert unter dieser Annahme das Kontomodell zu verändern. Dabei wählen sie die Verteilung der Energiemenge bzgl. der Energieformen bei den einzelnen Snapshots so, dass keine Umwandlung in innere Energie bzw. Energietransfer stattfindet. Die Schülerinnen und Schüler sollen mit Hilfe des Kontomodells begründen, welchen Punkt die Kugel am anderen Ende der Halbpipeline maximal erreichen würde. Dabei erläutern die Lernenden, dass die Kugel auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls maximal die Höhe der Ausgangsposition erreicht, da die Energiemenge durch die Starthöhe am Anfang des Vorgangs festgelegt wurde.

Ein Vergleich der beiden Kontomodelle lässt die Beobachtung zu, dass die Energiemenge sowohl bei reibungsfreien als auch real ablaufenden Vorgängen während des gesamten Vorgangs immer gleichbleibt. Anhand dieser Überlegungen sollen die Schülerinnen und Schüler die Unveränderlichkeit der Säulenhöhe im Kontomodell begründen. Diese Mengengleichheit wird als Energieerhaltung definiert.

Den Abschluss der Unterrichtsreihe bildet in der zweiten Hälfte der Doppelstunde die erneute Betrachtung der Experimente „Specht“, „magisches Pendel“, „Magic Kreisel“ und „Lichtwippe“. Damit die Schülerinnen und Schüler bei diesen Experimenten gemachten Erfahrungen aktivieren, wird eines der Experimente exemplarisch als Demonstrationsexperiment erneut durchgeführt. An dieser Stelle wird die Reihenleitfrage erneut aufgeworfen: *„Warum kommen manche Bewegungen scheinbar von allein zum Stehen, während andere weiterlaufen?“*. In diesem Zusammenhang beschreiben die Schülerinnen und Schüler den endenden Vorgang als Energieentwertungsprozess. Dabei erscheint der weiterlaufende Vorgang als unnatürlich, so dass dieser Vorgang durch etwas beeinflusst werden muss. Die Schülerinnen und Schüler äußern Vermutungen wie: *„der Kreisel wird irgendwie angetrieben“* oder *„die Batterie sorgt dafür, dass er weiterläuft“*. In diesem Rahmen sollte herausgestellt werden, dass trotzdem Entwertung stattfindet. Vertiefend kann hier auf einen Energietransfer von der Batterie zum Kreisel eingegangen werden.

Als Reihenende können die Schülerinnen und Schüler erneut eine Mind-Map auf Grundlage der Karten oder eigene Bilder anfertigen, die die Inhalte der gesamten Reihe abbilden soll.

B. Mediendidaktische Einbettung: angepasster Unterrichtsgang

B.1. Mechanische und nicht-mechanische Energieumwandlungen (6. DS)

In der sechsten Doppelstunde beobachten die Schülerinnen und Schüler verschiedene Vorgänge, beschreiben diese durch Energieumwandlungsprozesse und fertigen die zugehörigen Energiekontomodelle an. Dabei werden unterstützend Indikatoren als Beobachtungsgrößen herangezogen, die einen Schluss auf die Form und Menge von Energie zulassen. Bei diesen Vorgängen handelt es sich unter anderem um das Brennen eines Teelichts.

In diesem Zusammenhang erfolgt eine Anpassung des Lehr-Lern-Prozesses, indem die Schülerinnen und Schüler den Brennvorgang innerhalb des Stationenlernens zunächst in Kleingruppen und mittels IR-Kamera beobachten können. Im Rahmen der Ergebnissicherung stellen die Schülerinnen und Schüler das zugehörige Kontomodell vor und der Brennvorgang wird mittels IR-Kamera gemeinsam betrachtet. Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert das IR-Livebild zu beschreiben und sollen dabei den rot- und weißskalierten Bereichen eine erhöhte Temperatur zuordnen. In diesem Zusammenhang ziehen sie die Temperaturerhöhung als Indikator für die Zunahme der inneren Energie im Umwandlungsprozess heran. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise soll durch die gemeinsame Interpretation eine Verknüpfung zwischen dem IR-Bildes und der Umwandlung von Energie in innere Energie erreicht werden; also dem IR-Bild die Bedeutung als Evidenz für die Umwandlung in innere Energie zugeordnet werden.

In einem zweiten Schritt wird das Teeleucht gelöscht und weiterhin durch die IR-Kamera betrachtet. Die Lernenden können weiterhin temperaturerhöhten Bereiche identifizieren. Dabei stellen sie ebenfalls eine Temperaturerhöhung des Tisches fest, die sie mit ihren Alltagserfahrungen in Verbindung bringen sollen. Beispielsweise äußern die Lernenden die Beobachtung, dass der Raum durch Kerzen erwärmt wird.

Diese Feststellung korrespondiert mit dem Konzept des Energietransfers und kann bereist als gedankliche Vorbereitung der nächsten Stunden gesehen werden. Auf Energieentwertung wird hier jedoch noch nicht fokussiert.

B.2. Energietransfer (7. und 8. DS)

In der 7. und 8. Doppelstunde betrachten die Schülerinnen und Schüler im Rahmen eines Stationenlernens verschiedene Vorgänge aus energetischer Sicht und fertigen auf Grundlage ihrer Beobachtungen Energieflussdiagramme an.

Im Rahmen der Anpassung wird eine Dynamot-Station durch die Station „Spurensuche“ ersetzt, um den Umfang der Erarbeitung nicht zu erhöhen. Bei dieser Station erhalten die Schülerinnen und Schüler einen Handwärmer, den sie an verschiedenen Stellen des Tisches platzieren und wieder entfernen sollen. Bei der Betrachtung durch die IR-Kamera sehen die Lernenden auf dem Tisch an den Stellen, an denen zuvor der Handwärmer platziert wurde, temperaturerhöhte Bereiche. Zusätzlich sollen die Schülerinnen und Schüler diese Stellen befühlen, um ihnen eine Verknüpfung der Erfahrungen unterschiedlicher Sinne zu ermöglichen. Anhand dieser Beobachtung können die Schülerinnen und Schüler auf einen Energietransfer vom Handwärmer zum Tisch schließen. Mit Hilfe dieser Station soll hier eine Zuweisung des IR-Bildmaterials als Evidenz für Energietransfer erfolgen. Ein Zusammenhang zu Energieentwertung wird jedoch noch nicht direkt hergestellt.

Um durch den IR-Kameraführerschein keine zusätzliche Unterrichtszeit zu beanspruchen, wird das Stationenlernen in der ersten Hälfte der achten Doppelstunde beendet und danach der IR-Führerschein durchgeführt.

B.3. Energieentwertung bei Umwandlungsprozessen (9. DS)

Zu Beginn der neunten Doppelstunde wird als Demonstrationsexperiment das Herabfahren eines Wagens auf einer schiefen Ebene mit dem Rutschen auf dem Wagendach verglichen. Die Schülerinnen und Schüler argumentieren in diesem Zusammenhang mit auftretenden Reibungsprozessen und äußern bereits Vermutungen über eine mögliche Temperaturerhöhung. Im Rahmen der folgenden Anpassung des Lehr-Lern-Prozesses sollen die Schülerinnen und Schüler erläutern, wie sie ihre Vermutung am Experiment überprüfen könnten. An dieser Stelle ziehen die Schülerinnen und Schüler die IR-Kamera als Messinstrument heran und fertigen vom Rutschvorgang ein IR-Video an. In diesem Zusammenhang werden die mit Hilfe des IR-Kameraführerscheins aufgestellten Experimentierregeln erneut benannt. Das aufgenommene Video wird im Unterrichtsgespräch bezüglich der Einhaltung des Regelwerkes reflektiert und in einem zweiten Schritt hinsichtlich Energieumwandlung gedeutet. Dabei stellen die Lernenden ebenfalls die Temperaturerhöhung der Rampe fest und schließen aufgrund dessen auf einen Energietransfer.

Das anschließende Stationenlernen wurde dahingehend verändert, dass den Lernenden an zwei Stationen *vorgegebene IR-Videos* der Experimente zur Verfügung gestellt werden. Bei der Station „Klotzrutsche“ wird zunächst ein Experiment beschrieben, bei dem zwei Klötze mit verschiedenen Oberflächen eine schiefe Ebene hinabrutschen. Von diesem Vorgang wird den

Lernenden ein IR-Video zur Verfügung gestellt, welches sie zunächst beschreiben und in einem zweiten Schritt hinsichtlich der Energieumwandlung deuten sollen. Ebenfalls soll eine Zuordnung der Klötze zu den Vorgängen innerhalb des IR-Videos vorgenommen werden.

Bei der Station „Ballfall“ untersuchen die Schülerinnen und Schüler zunächst selbstständig das Springen eines Flummis mit der IR-Kamera und vergleichen dieses im Anschluss mit einem IR-Video, bei dem ein nicht elastischer Klotz zu Boden fällt. Auf dem Video ist die Temperaturerhöhung der Auftreffstelle des Klotzes erkennbar. Die Schülerinnen und Schüler sollen in diesem Zusammenhang erläutern, warum beim Klotz eine größere Temperaturerhöhung beobachtbar ist als beim Flummi.

In der Ergebnissicherung erfolgt bei der Besprechung der angefertigten Kontomodelle ebenfalls eine gemeinsame Interpretation der IR-Videos.

B.4. Energieentwertung bei Energieübertragungsketten Teil 1 und 2 (10. und 11. DS)

Zur Einführung in das Konzept des Energietransfers wurde in der siebten Doppelstunde ein Newtonpendel betrachtet und durch ein Energieflussdiagramm beschrieben.

Im Rahmen der Anpassung des Lehr-Lern-Prozesses wird in dieser Doppelstunde anstelle des Dynamots erneut das Newtonpendel betrachtet und als Energieübertragungskette beschrieben. In einem nächsten Schritt wird das Pendel durch die IR-Kamera betrachtet und das IR-Livevideo von den Schülerinnen und Schülern hinsichtlich der Temperaturerhöhung der Kontaktflächen beschreiben. Auf Grundlage dieser Beobachtung schließen die Schülerinnen und Schüler auf einen Energieentwertungsprozess. Das zugehörige Energieflussdiagramm wird um das Kettenglied „*Umgebung*“ ergänzt.

Die Aufgabenstellung weitere Vorgänge mittels IR-Kamera auf mögliche Energieentwertungsprozesse zu untersuchen, weicht dabei leicht von der bisherigen Perspektive ab. In dieser Formulierung erhalten die Schülerinnen und Schüler den Auftrag gezielt Temperaturerhöhte Bereiche bei den Vorgängen zu identifizieren. Dieses Vorgehen soll den Fokus noch stärker auf Energieentwertungsprozesse legen und den Schülerinnen und Schülern Orientierung während der Arbeitsphase bieten.

Die Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert, von jedem Vorgang Videos oder Fotos der identifizierten Entwertungsvorgänge aufzunehmen. Diese sollen ergänzend dem erweiterten Energieflussdiagramm zugeordnet werden. Da die Bilder im Unterricht häufig nicht gedruckt

werden können, werden den Schülerinnen und Schülern in diesem Zusammenhang im Vorfeld aufgenommene Bilder zur Verfügung gestellt. Diese bieten den Lernenden erneuten Gesprächsanlass hinsichtlich der Deutung als Evidenz für Energietransfer in die Umgebung und stellen ggf. Ergänzungen zu den eigenen gemachten Videos und Bildern dar.

B.5. Doppelstunde: Energieentwertung und -erhaltung (12. – 14. DS)

In diesen Stunden erfolgt eine allgemeine Anpassung des Lehr-Lern-Prozesses im Hinblick auf eine Intensivierung der Auseinandersetzung mit dem entstandenen IR-Bildmaterial. Es wurden vermehrt die von den Lernenden selbst aufgenommenen Videos in den Sicherungsphasen zur Argumentation herangezogen und hinsichtlich des Konzepts der Energieentwertung ge- deutet.

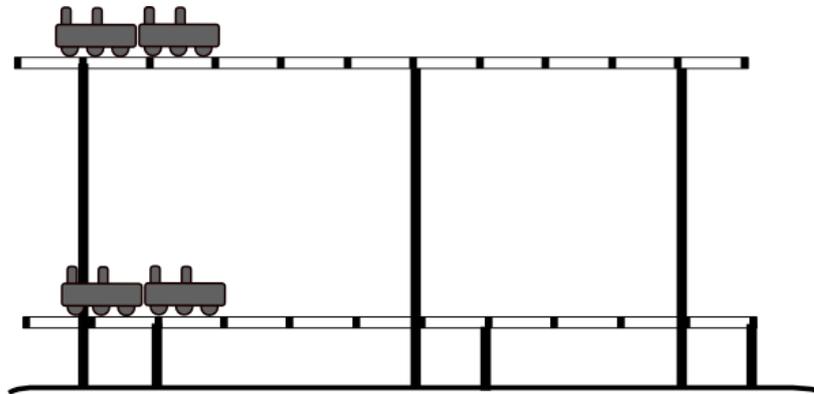
C. Testinstrumente

C.1. Energietest adaptiert von Michel (2018)

Bitte trage hier deinen Code ein:

--	--	--	--	--	--

1. Zwei Achterbahnwagen fahren mit derselben Geschwindigkeit auf unterschiedlich hohen Gleisen. Was kannst du über die Energie dieser beiden Wagen sagen?



- Der Wagen, der auf der oberen Bahn fährt, besitzt mehr Höhenenergie, aber eine gleich große Bewegungsenergie.
- Der Wagen, der auf der unteren Bahn fährt, besitzt nur Bewegungsenergie. Der andere Wagen besitzt nur Höhenenergie.
- Beide Wagen besitzen gleich viel Energie.
- Der Wagen, der auf der oberen Bahn fährt, besitzt weniger Höhenenergie, aber eine gleich große Bewegungsenergie.
- Der Wagen, der auf der unteren Bahn fährt, besitzt eine geringere Höhenenergie, dafür aber eine höhere Bewegungsenergie.

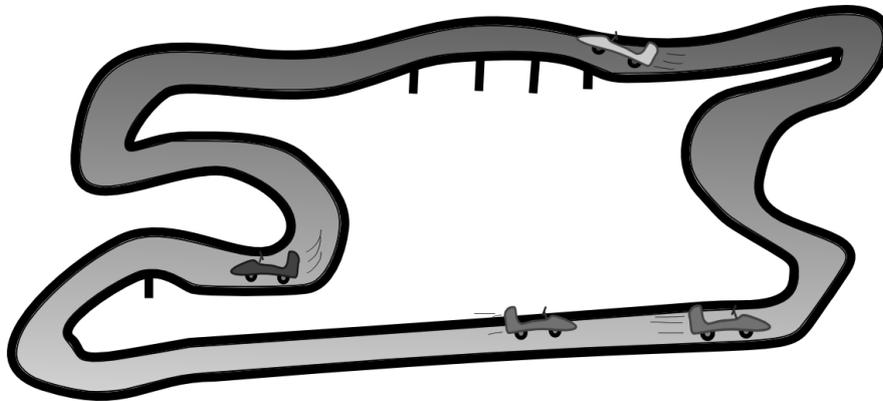
Begründe deine Antwort

Gib an, von welchen physikalischen Größen Bewegungsenergie und Höhenenergie abhängen.

2. Am Ende einer Achterbahnfahrt nimmt die Bewegungsenergie eines Achterbahnwagens ab. Was passiert mit der Bewegungsenergie, die er vorher hatte?

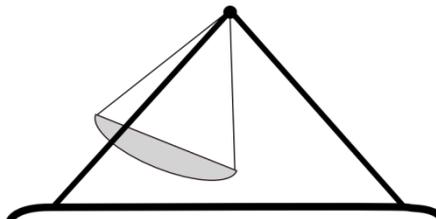
- Die Bewegungsenergie existiert immer noch, ist aber nicht länger aktiv.
- Die Bewegungsenergie ist verschwunden und existiert nicht mehr.
- Die Bewegungsenergie existiert weiter in einer anderen Energieform.
- Die Bewegungsenergie wurde verbraucht.

3. Die folgende Abbildung zeigt eine Gokart-Bahn. Wann benötigt ein Gokart, das auf dieser Bahn fährt, Energie?



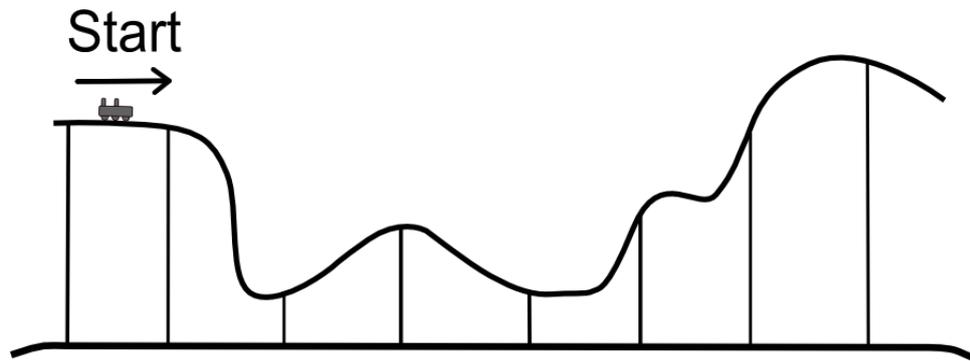
- Energie muss nur beim Beschleunigen aufgebracht werden.
- Energie muss nur aufgebracht werden, wenn der Wagen beschleunigt oder bergauf fährt.
- Energie muss nur aufgebracht werden, während der Wagen eine konstante Geschwindigkeit hat.
- Energie muss während der gesamten Fahrt aufgebracht werden.

4. Eine Schiffsschaukel schwingt ohne Antrieb hin und her. Dabei werden zwei Energieformen ineinander umgewandelt. Welche der folgenden Energieformen ist neben Bewegungsenergie an dem Umwandlungsprozess beteiligt?



- Elektrische Energie
- Spannenergie
- Höhenenergie
- Chemische Energie

5. Ein Achterbahnwagen fährt vom gekennzeichneten Punkt los. Markiere in der Abbildung, bis zu welchem Punkt der Wagen maximal fährt, wenn es keine Reibung geben würde.



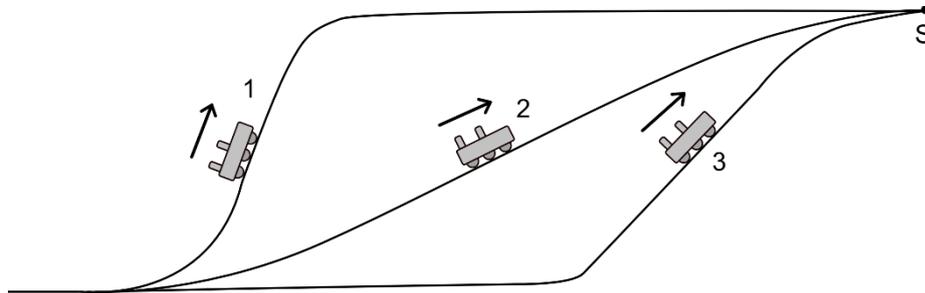
Begründe deine Antwort.

6. Lars und Julia stehen auf einer Bungee-Plattform. Lars lässt sich einfach hinunterfallen, Julia stößt sich noch mit den Füßen ab. Beide bewegen sich durch die Luft. Welche der folgenden Aussagen zur Bewegungsenergie der beiden ist richtig?

- Sowohl Lars, der sich fallengelassen hat, als auch Julia, die sich abgestoßen hat, haben Bewegungsenergie.
- Lars, der sich fallengelassen hat, hat Bewegungsenergie. Julia, die sich abgestoßen hat, hat keine Bewegungsenergie.
- Lars, der sich fallengelassen hat, hat keine Bewegungsenergie. Julia, die sich abgestoßen hat, hat Bewegungsenergie.
- Weder Lars, der sich fallengelassen hat, noch Julia, die sich abgestoßen hat, haben Bewegungsenergie.

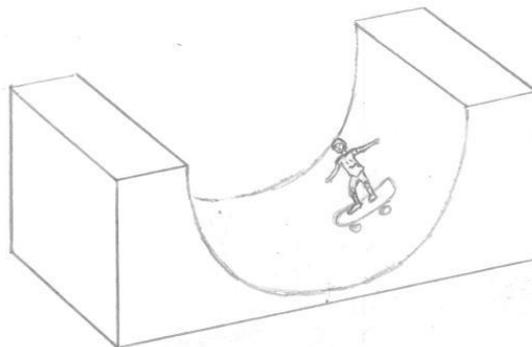
7. Bei vielen Achterbahnen fahren die Wagen auf Schienen – ganz wie bei einer Eisenbahn. Bei einer technischen Überprüfung stellen die Techniker fest, dass die Schienen sich leicht erwärmt haben, nachdem sie die Achterbahn mehrere Male kurz hintereinander darüber haben fahren lassen. Wie kannst du dir das erklären?

8. Drei Achterbahnwagen werden auf unterschiedlichen Wegen zum gleichen Startpunkt einer Achterbahnstrecke gefahren, Weg 1, Weg 2 und Weg 3. Die Wagen sind alle gleich groß und gleich schwer.



Stell dir vor, alle Wagen sind am Startpunkt „S“ der Strecke angekommen. Welcher Wagen hat dann die größte Höhenenergie?

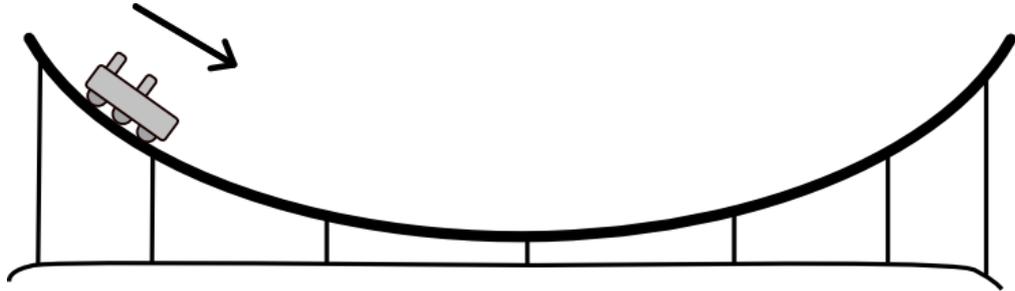
- Der Wagen, der Weg 1 genommen hat, hat die größte Höhenenergie.
 - Der Wagen, der Weg 2 genommen hat, hat die größte Höhenenergie.
 - Der Wagen, der Weg 3 genommen hat, hat die größte Höhenenergie.
 - Die Höhenenergie ist für alle drei Wagen gleich.
9. Jonas fährt mit seinem Skateboard in einer Halfpipe ohne Schwung zu holen.



Welche Energieformen treten hier auf?

Was passiert mit diesen Energien?

10. Die folgende Abbildung zeigt einen Achterbahnwagen, der ein Teilstück der Achterbahn hinunterrollt und dann auf der anderen Seite wieder hinaufschießt.



Welche der folgenden Aussagen ist richtig?

- Wenn der Wagen sich bewegt, bleibt die Bewegungsenergie immer gleich, die Höhenenergie bleibt ebenfalls immer gleich.
- Wenn der Wagen sich bewegt, ändert sich die Bewegungsenergie, die Höhenenergie bleibt aber gleich.
- Wenn der Wagen sich bewegt, bleibt die Bewegungsenergie gleich, die Höhenenergie ändert sich aber.
- Wenn der Wagen sich bewegt, ändern sich sowohl die Bewegungsenergie als auch die Höhenenergie.

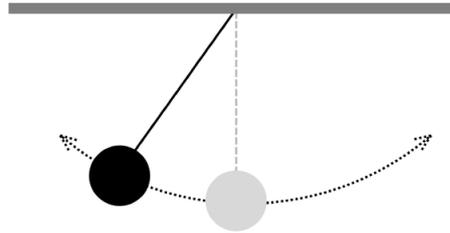
11. Auf einer Achterbahn kommt ein Wagen mit einer bestimmten Geschwindigkeit am Punkt 1 an. Er rollt dann wie in der folgenden Abbildung gezeigt über eine Erhebung. Wie ist seine Geschwindigkeit am Punkt 2, direkt nach der Erhebung, wenn man die Reibung vernachlässigt?



vernachlässigt?

- Seine Geschwindigkeit ist am Punkt 2 deutlich kleiner als am Punkt 1.
- Seine Geschwindigkeit ist am Punkt 2 ungefähr gleich der Geschwindigkeit an Punkt 1.
- Seine Geschwindigkeit ist am Punkt 2 geringfügig größer als am Punkt 1.
- Seine Geschwindigkeit ist am Punkt 2 deutlich größer als am Punkt 1.
- Die Informationen sind zur Beantwortung der Frage unzureichend.

12. Ein Schüler stößt ein Pendel an und beobachtet dann, wie es von einer Seite zur anderen schwingt. Nach einiger Zeit hört das Pendel auf zu schwingen. Warum?



- Beim Hin- und Herschwingen wird Bewegungsenergie verbraucht.
- Beim Hin- und Herschwingen wird Bewegungsenergie des Pendels auf die Luft und die Aufhängung übertragen.
- Beim Hin- und Herschwingen wird ein Teil der Bewegungsenergie auf die Luft übertragen und ein Teil verbraucht.
- Ein Objekt hat nur dann Bewegungsenergie, wenn eine Person es in Bewegung versetzt, und der Schüler stößt das Pendel nicht weiter an.

13. Im Sommer ist es Hendrik in der Küche zu warm. Um die Küche kühl zu halten, öffnet er den Kühlschrank. Wird der offene Kühlschrank die Zimmertemperatur verringern? Begründe deine Antwort.

14. Bei der Verbrennung von Gas findet ein Energieumwandlungsprozess statt. Welche Energieformen sind daran hauptsächlich beteiligt?

- Elektrische Energie und Innere Energie.
- Chemische Energie und Innere Energie.
- Chemische Energie und Bewegungsenergie.
- Höhenenergie und Bewegungsenergie.

15. Ein Gegenstand liegt auf einem Tisch. Wovon hängt seine Höhenenergie ab?

- Die Höhenenergie hängt von seiner Geschwindigkeit und seiner Masse ab.
- Die Höhenenergie des Körpers hängt von seiner Masse und der Höhe des Tisches ab.
- Der Körper hat nur Höhenenergie, wenn er sich bewegt.
- Der Körper hat nur Höhenenergie, wenn er sich nicht bewegt.

- 16. Diana lässt einen Gummiball auf den Boden fallen. Er springt einige Male hoch und runter. Die ersten Male erreicht er dabei fast die gleiche Höhe, aus der er losgelassen wurde. Erkläre, warum der Gummiball die ersten Male fast wieder die gleiche Höhe erreicht.**

- Nach einer Weile kommt der Ball nicht mehr so hoch, wie beim ersten Sprung. Erkläre, warum der Ball die ursprüngliche Höhe nicht mehr erreicht.**

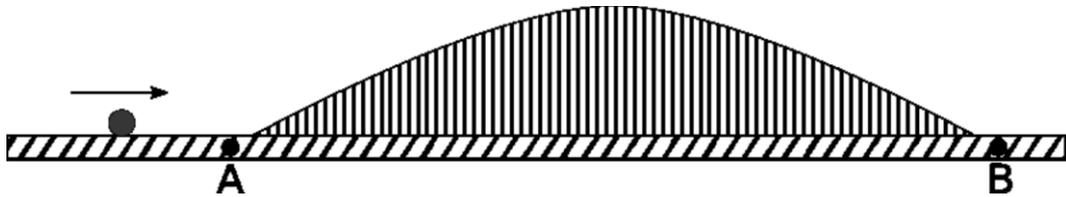
- 17. Mit einer Feder wird eine Kugel „abgeschossen“. Dabei wird elastische Energie der Feder als Bewegungsenergie auf die Kugel übertragen. Was ist beim Abschuss zu beobachten?**

- Die Feder dehnt sich schnell komplett aus, danach beschleunigt die Kugel schnell auf die maximale Geschwindigkeit.
- Die Kugel fliegt mit ihrer maximalen Geschwindigkeit davon, danach kann sich die Feder ausdehnen.
- Die Feder dehnt sich ohne Verzögerung aus, die Kugel braucht aber länger, um zu beschleunigen.
- Während die Feder sich ausdehnt, gewinnt die Kugel immer mehr an Geschwindigkeit.

- 18. Ein Wagen fährt eine Rampe herunter. Was gilt für die Bewegungsenergie und Höhenenergie des Wagens?**

- Seine Bewegungsenergie nimmt ab, seine Höhenenergie nimmt zu.
- Seine Bewegungsenergie nimmt zu, seine Höhenenergie bleibt gleich.
- Seine Bewegungsenergie nimmt zu, seine Höhenenergie nimmt ab.
- Beide Energieformen ändern sich nicht.

19. Die folgende Abbildung zeigt eine Stahlkugel, die mit einer bestimmten Geschwindigkeit über eine glatte, harte, ebene Fläche rollt. Zwischen den Punkten A und B rollt sie über einen Berg. Wie ist ihre Geschwindigkeit am Punkt B verglichen mit ihrer Geschwindigkeit in Punkt A, wenn es keine Reibung geben würde?

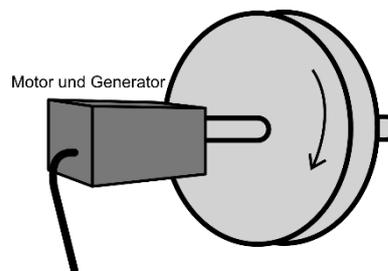


- Ihre Geschwindigkeit ist am Punkt B deutlich kleiner als am Punkt A.
- Ihre Geschwindigkeit ist am Punkt B ungefähr gleich der Geschwindigkeit an Punkt A.
- Ihre Geschwindigkeit ist am Punkt B ein bisschen größer als an Punkt A.
- Ihre Geschwindigkeit ist am Punkt B wesentlich größer als am Punkt A.
- Die Informationen sind zur Beantwortung der Frage unzureichend.

20. Wasser wird erhitzt. Was gilt für die Energie des Wassers?

- Die Gesamtenergie des Wassers nimmt ab.
- Die Gesamtenergie des Wassers bleibt gleich.
- Die innere Energie des Wassers wird entwertet.
- Die innere Energie des Wassers nimmt zu.

21. Ein Schwungrad (s. Abb.) kann Bewegungsenergie speichern, indem es sich dreht. Bei der Nutzung kann die gespeicherte Bewegungsenergie in eine andere Energieform umgewandelt werden. Aber auch, wenn keine Energie entnommen wird, dreht sich das Schwungrad



mit der Zeit langsamer. Was ist hier passiert?

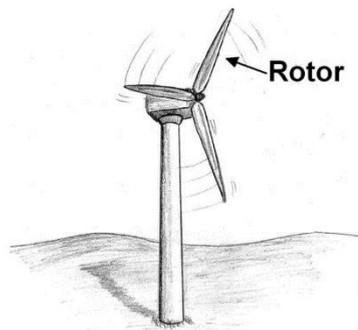
- Ein Teil der Bewegungsenergie wird an der Aufhängung und der Luft in innere Energie umgewandelt.
 - Die Bewegungsenergie geht mit der Zeit verloren.
 - Die Bewegungsenergie bleibt erhalten, nur die Geschwindigkeit hat abgenommen.
 - Es wird Höhenenergie benötigt, da sich eine Hälfte des Schwungrades immer aufwärtsbewegt.
22. Bei der Übertragung von elektrischer Energie über Hochspannungsleitungen steht am Zielort weniger elektrische Energie zur Verfügung als am Startort der Übertragung. Was ist mit der Energie passiert?

- Die fehlende Energie wurde vernichtet.
- Die fehlende Energie wurde etwa zur Hälfte in innere Energie umgewandelt, der Rest wurde vernichtet.
- Die fehlende Energie wurde vollständig in innere Energie umgewandelt.
- Die fehlende Energie fließt zurück zum Kraftwerk und wandelt sich dort vollständig in innere Energie um.

23. In einer Warmwassertherme wird heißes Wasser für die Nutzung im Haushalt vorrätig gehalten. Welche der folgenden Aussagen trifft auf die Isolierung der Wassertherme zu?

- Die Isolationsschicht der Wassertherme erwärmt das Wasser.
- Die Isolationsschicht hält das Wasser auf einer gleichbleibenden Temperatur.
- Durch die Isolationsschicht wird mehr Energie an die Umgebung abgegeben.
- Trotz der Isolationsschicht wird das Wasser kälter, sodass ständig nachgeheizt werden muss.

24. Der Rotor einer Windkraftanlage ist mit einem Kugellager befestigt (s. Abb.). Warum erwärmt sich dieses Kugellager während des Betriebs?

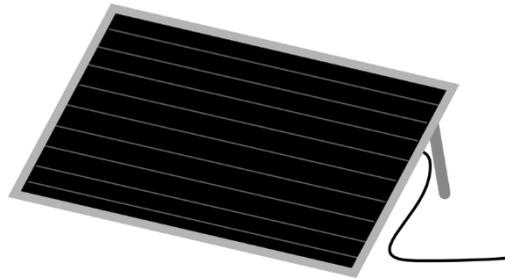


- Ein Teil der inneren Energie des Windes wird an das Kugellager abgegeben.
- Ein Teil der Bewegungsenergie des Rotors wird durch Reibung im Kugellager in Wärme umgewandelt.
- Die Windkraftanlage generiert einen elektrischen Strom, welcher das Kugellager erwärmt.
- Der zur Kühlung des Kugellagers benötigte Wind wird im Betrieb für die Stromerzeugung verwendet.

25. In einigen Städten gibt es Busse, die Schwungräder als Energiespeicher nutzen. Dazu wird die Bewegungsenergie des Busses beim Verringern der Geschwindigkeit auf das Schwungrad übertragen. Diese Energie nutzt der Bus anschließend wieder zum Anfahren. Nimm an, dass dieser Prozess verlustfrei abläuft. Was kannst du über die Geschwindigkeit des Busses sagen?

- Der Bus hat nach dem Haltevorgang die gleiche Geschwindigkeit wie davor.
- Der Bus hat nach dem Haltevorgang eine höhere Geschwindigkeit als davor.
- Der Bus hat nach dem Haltevorgang eine geringere Geschwindigkeit als davor.
- Die Geschwindigkeit des Busses nach dem Haltevorgang ist unabhängig von der Geschwindigkeit davor.

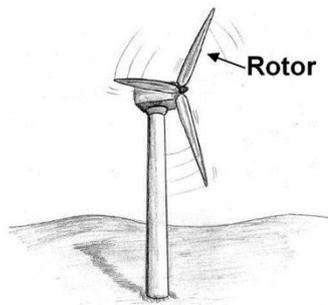
26. In einer Solarzelle wird Energie des Sonnenlichts in elektrische Energie umgewandelt (s. Abb.). Welche der folgenden Aussagen ist richtig?



Die Menge elektrischer Energie...

- ... entspricht der Menge aufgenommener Energie des Sonnenlichts.
- ... entspricht der Menge der Sonnenenergie plus der Menge der inneren Energie durch die Sonne.
- ... ist etwas größer als die Menge der aufgenommenen Energie des Sonnenlichts.
- ... ist kleiner als die Menge aufgenommener Energie des Sonnenlichts.

27. Woher stammt die Energie, die eine Windkraftanlage (s. Abb.) antreibt?



- Die Energie stammt aus der Bewegungsenergie des Windes.
- Die Energie stammt aus der innere Energie des Windes.
- Die Energie stammt aus der Höhenenergie des Windes.
- Die Energie stammt aus der elektrischen Energie des Windes bei Gewittern.

28. Schmelzwärmespeicher können Innere Energie speichern. Ein Beispiel sind „Taschenwärmer“, die beim Knicken warm werden. Was passiert beim Knicken mit der Energie?

- Der Taschenwärmer nimmt Energie aus seiner Umgebung auf.
- Der Taschenwärmer gibt Energie an seine Umgebung ab.
- Die Energie des Taschenwärmers wird vernichtet.
- Beim Taschenwärmer findet kein Transfer von Energie statt.

29. Ein hoch liegender Gegenstand besitzt gegenüber tiefer liegenden Gegenständen Höhenenergie. Wovon hängt diese Höhenenergie noch ab?

- Die Höhenenergie hängt vom Volumen des Gegenstandes ab.
- Die Höhenenergie hängt von der Form des Gegenstandes ab.
- Die Höhenenergie hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der der Gegenstand angehoben wurde.
- Die Höhenenergie hängt von der Masse des Gegenstandes ab.

30. In einem Raum hängt eine Lampe. Sie wird angeschaltet und nach einiger Zeit wieder ausgeschaltet. Wovon hängt es ab wie viel elektrische Energie dafür genutzt wurde?

- Von der Quelle der Energie.
- Von der Leistung der Lampe und der Zeit.
- Von der Helligkeit der Lampe.
- Von der Art der Lampe und dem Raum.

31. Du rollst mit dem Fahrrad einen Hügel herunter ohne in die Pedale zu treten. Trotzdem wirst Du immer schneller. Wie lässt sich dieser Vorgang aus physikalischer Sicht am besten beschreiben?

- Höhenenergie wird in Bewegungsenergie umgewandelt.
- Die Geschwindigkeit erhöht sich, aber die verschiedenen Energieformen bleiben gleich.
- Chemische Energie wird in Bewegungsenergie umgewandelt.
- Spannenergie wird in Geschwindigkeit umgewandelt.

32. Die Akkuanzeige eines Handys steht bei 25 %. Was ist mit der Energie passiert, die ursprünglich im Akku gespeichert war?

- Sie wurde etwa zur Hälfte an die Umgebung abgegeben und ist zur Hälfte noch im Handy gespeichert.
- Sie wurde fast vollständig an die Umgebung abgegeben, ist aber nicht mehr ohne weiteres nutzbar.
- Sie befindet sich noch im Akku, ist aber nicht mehr ohne weiteres nutzbar.
- Sie wurde verbraucht und ist nun vollständig verschwunden.

33. Ein Elektroauto fährt mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 km/h durch die Stadt. An einer Ampel muss es anhalten. Weil das Auto mit einem Energierückgewinnungssystem ausgestattet ist, wird die Bewegungsenergie wieder in der Batterie des Autos gespeichert.

Welche Geschwindigkeit kann das Auto danach maximal erreichen, wenn es nur die gespeicherte Energie zum Beschleunigen nutzt?

- etwa 25 km/h
- etwa 50 km/h
- etwa 100 km/h
- Das Fahrzeug kann nur mit der gespeicherten Energie nicht beschleunigen.

34. Häufig wird im Alltag von „Energieverbrauch“ oder „Energieverlust“ gesprochen. Was ist damit aus physikalischer Sicht gemeint?

35. Was versteht man in der Physik unter dem Begriff „Energieerhaltung“?

36. Wie würdest du deinen Eltern den Begriff „Energie“ erklären? Wozu ist sie gut? Was ist das Besondere an Energie?

C.2. Fachspezifisches Interesse adaptiert nach Köller et al. (2000)

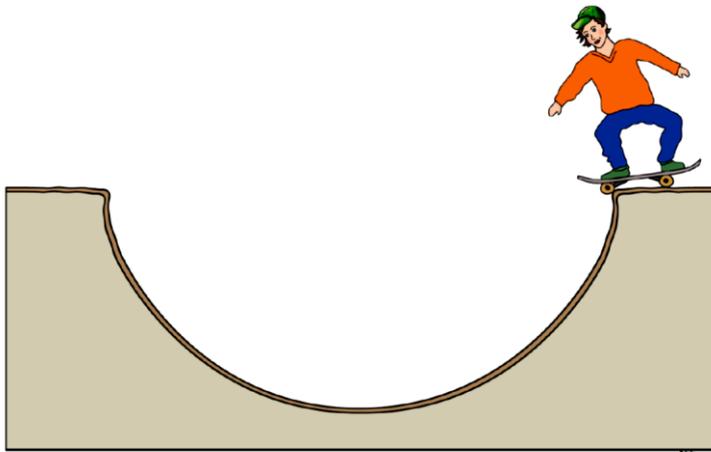
Fragestellung	Ich stimme nicht zu	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme zu
An einem physikalischen Problem zu knobeln, macht mir einfach Spaß	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es ist für mich persönlich wichtig, ein guter Physiker oder eine gute Physikerin zu sein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn ich an einem physikalischen Problem sitze, kann es passieren, dass ich gar nicht merke wie die Zeit verfliegt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn ich in Physik etwas Neues dazu lernen kann, bin ich bereit, auch Freizeit dafür zu verwenden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Physik gehört für mich persönlich zu den wichtigsten Dingen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C.3. Interviewaufgaben und Leitfaden

C.3.1. Interviewaufgaben adaptiert nach Lindner (2014)

Aufgabe 1:

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren.



Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

Aufgabe 2:

Du hebst einen Stein hoch und lässt ihn fallen:



Was kannst du über die Energie des Steins sagen?

Aufgabe 3:

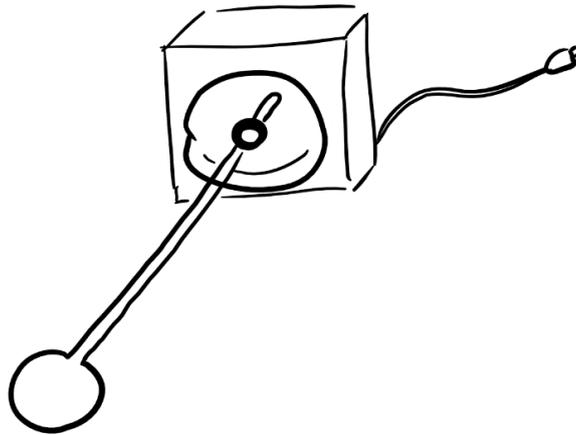
Ein Kind sitzt auf einer Rutsche und möchte gleich losrutschen.



Was kannst du über die Energie des Kindes sagen?

Aufgabe 4:

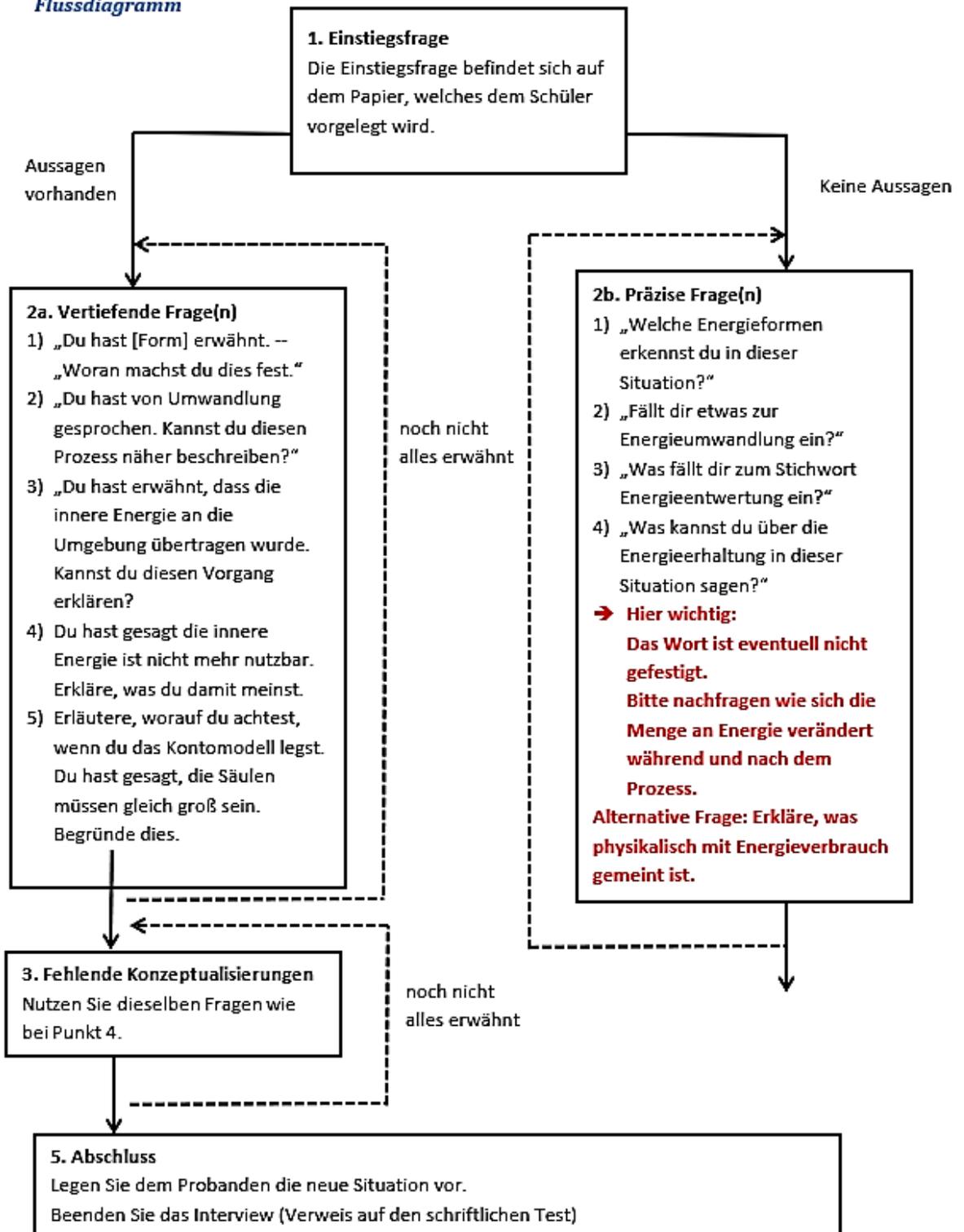
Ein Pendel ist an einem Motor befestigt. Es wird ausgelenkt und losgelassen.



- a) Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor **ausgeschaltet** ist.
- b) Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor **eingeschaltet** ist.

C.3.2. Interviewleitfaden adaptiert nach Lindner (2014)

Flussdiagramm



D. Ergänzende Auswertungen der Energietest- und Interviewdaten

D.1. Qualitative Auswertung der Interviews für den Aspekt Erhaltung

D.1.1. Erhaltung LoIR und LmIR

Begriffsverständnis

Im Zusammenhang mit Energieerhaltung konnte in beiden Untersuchungsgruppen bei vielen Teilnehmenden ein fehlerhaftes Begriffsverständnis festgestellt werden. Unabhängig von der Aufgabenstellung beschreiben diese, dass Energieerhaltung nur gelte, wenn eine oder mehrere Energieformen dem Vorgang bis zum Ende des Prozesses zugeordnet werden könnten:

*LoIR_D**:* „ja eigentlich ist hier keine, wenn, wirkliche Energieerhaltung. Also die Höhenenergie taucht ja auch wieder auf am Ende, aber sie ist nicht durchgehend da, deswegen...“

*LmIR_A**:* „Ähm. Also, ich glaub, ähm, hier unten gibt es dann keine Energieerhaltung mehr. Nämlich ist es ja irgendwie, dass es eben keine Bewegungs- oder Höhenenergie mehr hat und nur noch entwertete Energie.“

Ebenfalls lässt sich gruppenübergreifend die Vorstellung identifizieren, dass Energieerhaltung nur gelte, wenn die Energie über den gesamten Vorgang beim Objekt, beispielsweise dem Skater, bleibe. Nach dieser Definition gibt es durch Übertragung von Energie in die Umgebung keine Energieerhaltung:

LmIR_F:* „Ja, wenn der Skateboardfahrer nämlich stoppt ist ja die Bewegungsenergie ja nicht mehr vorhanden und auch nicht die Höhenenergie, wenn er vom Board steigt. Und wenn sie sich noch bewegen, dann ist da ja noch die Höhenenergie und die Bewegungsenergie.“

Interviewer: „Ist dieser einfach weg, wenn der vom Board steigt?“

LmIR_F:* „Nein, die ist an die Umgebung abgegeben.“

Jedoch können bei diesen Teilnehmenden ebenfalls Aussagen zur Energieerhaltung im Sinne des Mengenerhalts exzerpiert werden, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden. Dies deutet auf ein nicht gefestigtes Verständnis vom Begriff Erhaltung hin.

Aufgabe 1: Der Skater auf der Halfpipe

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren. Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

Viele der interviewten Schülerinnen und Schüler beschreiben beim Anfertigen des Kontomodells zum Energieumwandlungsprozess beim fallenden Stein, dass die Anteile der Energieformen zusammen eine gleichgroße Säule ergeben müssen. Jedoch stellen nur wenige Teilnehmende der Gruppe LoIR hierbei einen Zusammenhang zum Energiekonzept her. Demgegenüber äußern nahezu alle Teilnehmenden der Gruppe LmIR allgemein, dass die Energiemenge immer gleichbleibe, nehmen jedoch keinen Bezug zur konkreten Situation:

*LmIR_D**:* „Ja, dass es halt gleich groß ist, weil, Energie geht halt nicht verloren und das hier geht halt auch nicht verloren, aber wird halt an die Umgebung abgegeben. Aber Energie geht halt nicht verloren, sondern wandelt sich nur um.“

Tabelle 43: Identifizierte Schüleraussagen im Zusammenhang mit Erhaltung im Rahmen von Aufgabe 1.

Aufgabe 1: Erhaltung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Alltagssprachegebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Schwung erreicht er wieder die ganze Höhe.	2	0,06		
	Es muss eine Säule ergeben, weil es im Unterricht auch so war. Es gibt dafür keinen energetischen Grund.	2	0,06		
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Energie wird verbraucht.	2	0,19	1	0,06
anknüpfungsfähige Vorstellungen	Es muss immer eine ganze Säule ergeben.	4	0,38	7	0,44
Lehrgangsvorstellungen	Die Energiemenge bleibt gleich.	2	0,31	7	0,56
	Am Ende des Vorgangs wird die Energie komplett in die Umgebung abgegeben.	1	0,06		
	Die Energie wird komplett in innere Energie umgewandelt.			1	0,06
	In der Umgebung bleibt die innere Energie erhalten.			2	0,19

Nur einzelne, als leistungsstark eingeschätzte Teilnehmende nehmen in ihren Erläuterungen Bezug auf den Mengenerhalt der Energie beim Skaten:

*LmIR_G***:* „Also hier wird die Höhenenergie, die wandelt sich halt immer weiter in Bewegungsenergie und innere Energie um und irgendwann wandelt sich die Bewegungsenergie halt komplett in innere Energie um. Weil, wenn er stoppt, ist ja keine Bewegungsenergie mehr vorhanden und auch keine Höhenenergie, sondern da ist nur noch die innere Energie da, von der Reibung.“

LoIR_A***: „Die Höhenenergie wird danach wieder in Bewegungsenergie umgewandelt, danach wieder in Höhen- und wieder in Bewegungsenergie umgewandelt und so geht es weiter, bis die gesamte Energie an die Umgebung abgegeben wurde.“

Jedoch lassen sich in der Gruppe LoIR auch Aussagen zum Energieverbrauch identifizieren, die der Kategorie *nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen* zugeordnet wurden:

LoIR_F*: „Nein, am Ende ist sie am größten, weil dann ja auch noch kaum noch Schwung hat. Also, weil er da noch kaum Schwung hat. Und das Skateboard ja die Bewegungsenergie verbraucht, um hoch zu kommen.“

Bei der Betrachtung der Energiekontomodelle der Gruppen fällt auf, dass zwei Teilnehmende die Regel des Einhaltens der Säulenhöhe nur für die Formen Höhen- und Bewegungsenergie beachten und die innere Energie zum Umwandlungsprozess zusätzlich dazulegen (vgl. Abbildung 60). Dies spricht dafür, dass innere Energie hier nicht als Teil des Umwandlungsprozesses betrachtet wird, sondern im Laufe des Vorgangs dazukommt oder „entsteht“. Zwar äußern beide Teilnehmenden, dass sich die Höhen- und Bewegungsenergie in innere Energie umwandelt und gehen darüber hinaus auf die Energieübertragung in die Umgebung ein, jedoch steht das gelegte Kontomodell im Widerspruch zu ihren Erläuterungen. Mögliche Erklärungen hierfür sind, dass beide Vorstellungen parallel existieren oder die Teilnehmenden lediglich die „richtige Sprechweise“ verwenden können.

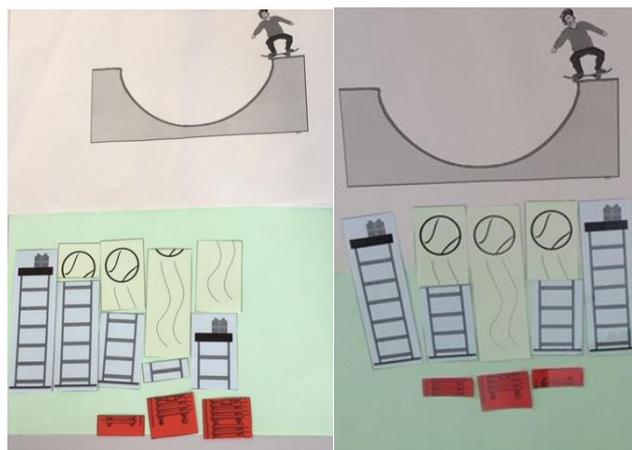


Abbildung 60: Energiekontomodelle von LoIR_C* (links) und LmIR_C* (rechts).

Insgesamt lassen sich beim Skater nur bei einzelnen Teilnehmenden Aussagen identifizieren, die auf ein tiefergehendes Verständnis im Sinne des Mengenerhalts hindeuten (vgl. Tabelle 43).

Aufgabe 2: Der fallende Stein

Du hebst einen Stein hoch und lässt ihn fallen. Was kannst du über die Energie des Steins sagen?

Im Rahmen dieses Kontextes konnten in der Gruppe LoIR insgesamt nur wenige Aussagen dem Aspekt der Energieerhaltung zugeordnet werden (vgl. Tabelle 44).

Ein*e Teilnehmende*r dieser Gruppe stellt explizit heraus, dass der Mengenerhalt der Energie zwar aus dem Unterricht bekannt sei, sie*er jedoch bei diesem Szenario nicht von dessen Gültigkeit überzeugt sei:

LoIR_H***: „(überlegt) also, vorm Aufprall hat er ja... ist er noch ziemlich schnell. Und beim Aufprall ist es ja [...] die Lageenergie ja eigentlich nicht mehr vorhanden, aber ich glaube nicht, dass die einfach weg ist. Also meistens wird es ja irgendwie umgewandelt, aber es entsteht ja auch keine große Reibung, d. h. es würde ja auch eigentlich nicht in innere Energie umgewandelt werden. Deshalb bin ich mir da tatsächlich nicht sicher.“

Interviewer: „Aber, es muss irgendwie umgewandelt werden oder muss nicht oder nur ein Teil?“

LoIR_H***: „Ich glaube es muss nicht unbedingt.“

Interviewer: „Und wie sieht es dann mit der Menge an Energie aus?“

[...]

LoIR_H***: „Ich glaube sie verschwindet eher als dass sie in irgendwas... Aber ich glaube, aber wir hatten doch im Unterricht, dass das eigentlich nie, eigentlich nie richtig weg ist. Ich weiß gerade nur nicht wie man das bei diesem Beispiel irgendwie ... Also, ich glaub, also über diesen weiß... glaube ich, dass das eher weg ist als weniger.“

Demgegenüber konnten bei der Hälfte der Teilnehmenden der Gruppe LmIR, die mit den Lehrgangsinhalten korrespondierende Aussage identifiziert werden, dass die Energiemenge immer gleich bleibe. Drei Teilnehmende äußerten zudem, dass die Energie in der Umgebung ebenfalls erhalten bleibe:

LmIR_H*: „[...] Ich glaub dann geht sie an die Umgebung. Und verteilt sich dort und ich glaube, dann bleibt sie halt in der Umgebung erhalten.“

Zwei Teilnehmende beschreiben, dass der Stein nach dem Aufprall auf dem Boden keine Energie mehr habe oder ordnen diesem eine nicht geeignete Energieform zu:

LmIR_E***: „Nein ich glaub, weil, in dem Moment entsteht ja ein bisschen Reibung und wenn er auf den Boden fällt, entsteht eher ein bisschen Reibung. Aber das da dann gleich so viel innere Energie dazu kommt... Nein, ich glaube nicht. Aber es kann natürlich sein. [...] ja, in dem Moment, wo er auf dem Boden fällt, dann reibt er in dem Moment auch mit dem Boden [...] da haben wir auf jeden Fall schon mal Energie. Also leg ich da jetzt gleich jetzt was ganz Großzügiges hin, damit ich umso weniger da noch hinlegen muss ... Was hatten wir denn noch für Energieformen so (überlegt)?“

LoIR_D**: „Ich glaube mehr als die Hälfte, aber ein bisschen bleibt auch noch, also, jetzt beim Stein, weil ja nach dem Aufprall ist da ja auch noch ein bisschen Bewegungsenergie da halt, aber auch nicht zu viel.“

Ähnliche Äußerungen zum Energieerhalt zeigten sich in der Studie von Solomon (1985), die als mögliche Ursache eine Missinterpretation der Formulierung „Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden“ benennt (vgl. Kapitel 2.4.2). Herauszustellen ist, dass diese Formulierung jedoch im Lehrgangsunterricht nicht verwendet wurde.

Tabelle 44: Identifizierte Aussagen zur Erhaltung im Rahmen von Aufgabe 2.

Aufgabe 2 Erhaltung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Die Menge der Gesamtenergie ändert sich im Laufe des Prozesses .	1	0,06		
Kognitiver Konflikt zu den Unterrichtsinhalten	Wir hatten das zwar im Unterricht , aber ich kann mir nicht vorstellen , dass die (ganze) Energie umgewandelt wird, sie wird verbraucht.	1	0,06		
anknüpfungsfähige Vorstellungen	Es muss immer eine ganze Säule ergeben.			4	0,25
	Nach dem Aufprall muss dem Stein weiterhin eine unbekannte Energieform zugeordnet werden.	1	0,06	1	0,06
Lehrgangsvorstellungen	Die Menge an Energie bleibt gleich, sie wandelt sich nur um.			4	0,25
	Am Ende des Vorgangs wird die Energie komplett in die Umgebung abgegeben.	1	0,06	1	0,13
	In der Umgebung bleibt die innere Energie erhalten.			3	0,25

3. Aufgabe: Das rutschende Kind

Ein Kind sitzt oben auf einer Rutsche und möchte gleich losrutschen. Was kannst du über die Energie des Kindes sagen?

Bei diesem Szenario konnten in beiden Gruppen überwiegend ähnliche Aussagen beobachtet werden, jedoch weisen diese einen unterschiedlichen durchschnittlichen Ausprägungsgrad auf (vgl. Tabelle 45). Während bei der Gruppe LoIR Äußerungen zum Energieverbrauchsvorstellung sowie zum Mengenerhalt noch nahezu identisch ausgeprägt sind, überwiegen in der Gruppe LmIR Aussagen zum Mengenerhalt.

Tabelle 45: Identifizierte Aussagen zum Aspekt Erhaltung im Rahmen von Aufgabe 3.

Aufgabe 3: Erhaltung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Energie wird verbraucht.	3	0,31	1	0,06
Kognitiver Konflikt zu Unterrichtsinhalten	Wir hatten das zwar im Unterricht , aber ich kann mir nicht vorstellen , dass die (ganze) Energie umgewandelt wird, sie wird verbraucht.			1	0,06
anknüpfungsfähige Vorstellungen	Die Energie muss immer eine ganze Säule ergeben.	2	0,19	3	0,25
Lehrgangsvorstellungen	Energie bleibt die ganze Zeit erhalten, sie wird nur umgewandelt.	3	0,25	5	0,56
	Am Ende des Vorgangs wird die Energie an die komplett an die Umgebung gegeben.	1	0,06	1	0,06
	Die gesamte Energie wurde in innere Energie umgewandelt.	2	0,13	1	0,06

Drei Teilnehmende der Gruppe LoIR, die als leistungsschwach bis mittelmäßig eingeschätzt wurden, halten die Säulenhöhe beim Anfertigen der Kontomodelle nicht ein (vgl. Abbildung 61), sondern legen die Energie der Umgebung zum Umwandlungsprozess des Kindes dazu. Dies deutet darauf hin, dass der Energietransfer nicht mit dem Umwandlungsprozess in Verbindung gebracht wird.

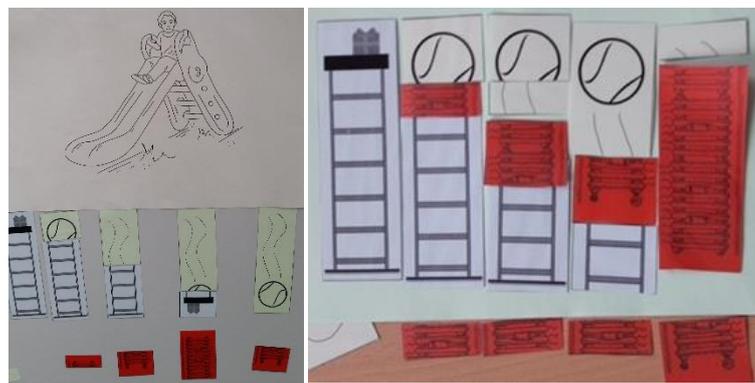


Abbildung 61: Kontomodelle der Aufgabe 3 von LoIR_C* (links) und LoIR_H**(rechts).

Herauszustellen ist hier die Beobachtung, dass bei diesem Vorgang ein*e als leistungsstark eingeschätzte*r Teilnehmende*r Zweifel an den Unterrichtsinhalten äußert:

LmIR_E***: „Ich vermute natürlich, dass es irgendwas... dass es sich komplett in innere Energie umwandelt, aber ich kanns mir einfach nicht vorstellen. Es wird wahrscheinlich so sein, weil... weil es kann ja keine Energie... es kann sein, dass es irgendeine Energieform ist, die ich nicht kenne, aber sonst hätten wir die hier wahrscheinlich [bei den zur Verfügung gestellten Karten]. Und deswegen ist es wahrscheinlich, dass es sich komplett in innere Energie umwandelt. Aber ich glaube es halt nicht.“

Dies ist überraschend, da die Gruppe LmIR im Unterricht fallende Objekte mit der IR-Kamera untersucht hat und deutet darauf hin, dass diese*r Teilnehmende die IR-Bilder nicht als Evidenz für die Umwandlung in innere Energie bewertet.

Aufgabe 4a: Das Pendel ohne Motor

Ein Pendel ist an einem Motor befestigt. Du lenkst es aus und lässt es los. Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor ausgeschaltet ist?

Für das Pendel bei ausgeschaltetem Motor ergibt sich im Gruppenvergleich ein eher heterogenes Bild (vgl. Tabelle 46). Obwohl im Lehrgang im mehreren Unterrichtssituationen ein Pendel betrachtet wurde, konnten in beiden Gruppen vermehrt Aussagen exzerpiert werden, die der Kategorie *nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen* zugeordnet wurden.

Tabelle 46: Identifizierte Aussagen zum Aspekt Erhaltung im Rahmen von Aufgabe 4a.

Aufgabe 4a: Erhaltung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Naives Verständnis zum Begriff Erhaltung	Energieerhaltung meint, dass das Pendel immer weiter schwingt.	1	0,06		
	Energieerhaltung gilt nur bei eingeschaltetem Motor.			1	0,06
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Energie wird verbraucht.	3	0,25	1	0,06
	Im Pendel wird Energie gespeichert, die für ein erneutes Pendel wiederverwendet werden kann.			1	0,06
	Die innere Energie der Aufhängung kommt zur gesamten Energie hinzu.			1	0,06
Anknüpfungsfähige Vorstellung	Es muss immer eine ganze Säule ergeben.			2	0,19
Lehrgangsvorstellungen	Energie bleibt die ganze Zeit erhalten, sie wird nur umgewandelt.	5	0,31	2	0,19
	Wenn es keine Reibung gäbe, dann würde es immer weiter schwingen.	1	0,06		

Während sich über die Hälfte der Teilnehmenden der Gruppe LoIR allgemein zum Mengenerhalt von Energie äußert, formulieren dies nur wenige Teilnehmende der Gruppe LmIR.

Herauszustellen ist hier, dass ein*e Teilnehmende*r der Gruppe LoIR selbstständig einen Abstraktionsschritt vornimmt, indem er sich zu einer hypothetisch reibungsfreien Situation äußert:

LoIR_E***: „Also, ich glaube auch, weil es sich reibt und wenn halt keine Reibung da wäre, dann würde es die ganze Zeit hin und herschwingen. Aber, wenn... weil [...] die Reibung ja auch Energie entzieht... und deswegen kann es halt nicht die ganze Zeit weiter hin und herschwingen.“

Aufgabe 4b): Das motorisierte Pendel

Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor eingeschaltet ist?

In beiden Untersuchungsgruppen beschreibt eine Mehrheit der Teilnehmenden auf intuitiver Ebene, dass das Pendel mit eingeschaltetem Motor nicht aufhöre zu schwingen, da der Motor die Energie *erhalte* (vgl. Tabelle 47).

Dabei äußert sich eine Vielzahl der Teilnehmenden der Gruppe LmIR zum Mengenerhalt der Energie und geht dabei explizit auf das Erreichen der vollständigen Pendelamplitude ein. Da bei diesem Vorgang jedoch zusätzlich Energie in das System transferiert wird, nimmt die Energiemenge bei diesem Vorgang stetig zu, weshalb diese Aussagen in diesem Zusammenhang der Kategorie *anknüpfungsfähige Vorstellungen* zugeordnet wurden.

In beiden Gruppen beschreiben einzelne Teilnehmende, dass der Motor Energie *hinzugefüge*:

LoIR_A***: „(Legt das Kontomodell) die sind ja jetzt unterschiedlich, weil.... Weil, hier wird Energie, elektrische Energie, noch hinzugefügt.“

In der Gruppe LmIR können bei einer Vielzahl der Teilnehmenden, mit mittlerem durchschnittlichen Ausprägungsgrad, differenziertere Äußerungen zum motorisierten Pendel beobachtet werden:

LmIR_D***: „Ich würde mal denken, von dem Motor... Und das dann halt irgendwie sozusagen... regeneriert oder so. [...] Dann würde ich halt eigentlich hier alles gleich legen [wie bei 4a], obwohl Energie in die Umgebung abgegeben wird, weil es kann ja eigentlich nicht verhindert werden, weil es reibt trotzdem an der Luft und dann würde ich halt alles gleich legen. Da ist ja halt auch halt auch mehr Bewegungsenergie vorhanden und dann auch mehr Bewegungsenergie und auch innere Energie... und das

dann halt hier alles auf einer Höhe ist. Und hier dann sozusagen, also... Dass trotzdem Energie abgegeben wird und es dann trotzdem weiter pendeln kann.“

Tabelle 47: Identifizierte Aussagen zum Aspekt Erhaltung im Rahmen von Aufgabe 4b.

Aufgabe 4b: Erhaltung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Alltagssprache- brauch/ Erfahrungs- wissen	Durch den Motor hört das Pendel nicht auf zu schwingen,	5	0,50	5	0,50
	durch den Strom.	2	0,13		
	Durch den Motor hat das Pendel überall die- selbe Geschwindigkeit.	1	0,06		
	Das Pendel erreicht wieder die Ausgangshöhe.			4	0,31
	Durch die Erwärmung geht der Motor kaputt.	1	0,06		
Kognitiver Konflikt	Wenn die innere Energie berücksichtigt wird, dann ist es mehr als eine Säule, das darf nicht sein.	1	0,13	3	0,25
Nicht anknüpfung- fähige Vorstellung	Energie wird verbraucht.	3	0,19	1	0,13
Anknüpfungsfähige Vorstellung	Der Motor erhält die Energie.	3	0,19		
	Die Energie bleibt erhalten.	3	0,19	5	0,31
Lehrgangs- vorstellungen	Der Motor fügt Energie hinzu.	2	0,19	2	0,13
	Der Motor regeneriert die Energie, sodass Hö- hen- und Bewegungsenergie wieder eine ganze Säule ergeben.	1	0,13	6	0,50

Das Anfertigen des zugehörigen Energiekontomodells stellt für einige Teilnehmende eine Herausforderung dar, da eine gleichbleibende Säulenhöhe unter Berücksichtigung der Entwertung nicht eingehalten werden kann:

*LmIR_B**:* „Ja, also, es ist schwierig, das zu... zu legen, da... Höhenenergie eigentlich sozusagen hundertprozentig vorhanden ist, aber nicht hundertprozentig, da auch innere Energie vorhanden ist. Ja, und ich habe das jetzt so aufgeteilt, auf jeden Fall - ja, das sieht man ja. Ja... es ist... schwierig, also ich meine es eigentlich so, dass es wieder auf der vollen Höhe ist, aber es ist trotzdem auch noch innere Energie vorhanden, die löst sich dann ja nicht in Luft auf, die vorher entstanden ist. Wenn ich jetzt Höhenenergie machen würde, dann wäre die Energie, die vorher entstanden ist, wäre sozusagen wie weg. Und das ist sie ja nicht. Sie ist ja nur... sie hat sich halt einfach umgewandelt.“

D.1.2. Erhaltung tE und LoIR

Aufgabe 1: Der Skater auf der Halfpipe

Ein Skater steht oben auf einer Halfpipe und möchte gleich losfahren. Was kannst du über die Energie des Skaters sagen?

In beiden Untersuchungsgruppen konnten beim Skater in weiten Teilen ähnliche Aussagen identifiziert werden (vgl. Tabelle 48). Beide Gruppen argumentieren im Zusammenhang mit Energieerhaltung auf einer eher allgemeinen Ebene, ohne Bezug zum konkreten Szenario:

tE_E***: „[Energieerhaltung ist], dass die Energie nie ...immer existiert. Also nicht weggeht.“

Hierbei treffen in der Gruppe tE insgesamt mehr Teilnehmende Aussagen zum Energieerhalt als in der Gruppe LoIR, jedoch erreichen beide Gruppen einen ähnlichen mittleren Ausprägungsgrad.

Tabelle 48: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 1 im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 1: Erhaltung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Alltagssprachegebrauch/Erfahrungswissen	Durch den Schwung erreicht er wieder die ganze Höhe.	1	0,06	2	0,06
	Der Schwung bleibt gleich, deswegen erreicht der Skater wieder die gesamte Höhe.	1	0,11		
	Es muss eine Säule ergeben, weil es im Unterricht auch so war. Es gibt dafür keinen energetischen Grund.			2	0,06
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellungen	Energie wird verbraucht.	2	0,11	2	0,19
anknüpfungsfähige Vorstellungen	Es muss immer eine ganze Säule ergeben.	7	0,44	4	0,38
	Unsicherheit beim Verbleib der Energie zum Ende des Vorgangs.	2	0,11		
Lehrgangsvorstellungen	Die Energiemenge bleibt gleich.	5	0,33	2	0,31
	Am Ende des Vorgangs wird die Energie komplett in die Umgebung abgegeben.			1	0,06

In der Gruppe tL konnte bei zwei Teilnehmenden eine Unsicherheit hinsichtlich des Verbleibs der Energie nach Ende des Skatevorgangs beobachtet werden:

tE_I***: „Weil wir glaube ich einmal gemeint bzw. [nennt den Namen der Lehrperson] gemeint hat, dass man Energie glaube ich nicht wirklich aufbrauchen kann. Also nicht bzw. komplett verschwinden kann.“

Interviewer: „Könntest du dir vorstellen, wenn sie nicht weg ist, wo die dann ist?“

tE_I***: „Nein.“

Aufgabe 2: Der fallende Stein:

Du hebst einen Stein hoch und lässt ihn fallen. Was kannst du über die Energie des Steins sagen?

Beim Szenario des fallenden Steins konnten in den Gruppen keine identischen Aussagen identifiziert werden (vgl. Tabelle 49).

In der Gruppe tE beschreiben vier Teilnehmende, dass die Energiemenge immer gleichbleibe:

tE_F**: „Also, die Energie wird glaube ich allgemein, ist am Ende noch genauso viel Energie da“.

Jedoch beschreiben über die Hälfte der Teilnehmenden, darunter auch zwei, die sich zum Mengenerhalt äußern, dass der Stein auf dem Boden *keine* Energie mehr habe:

tE_H*: „Also Höhenenergie und dann wird der fallen gelassen und dann nimmt Höhenenergie ab und die Bewegungsenergie nimmt zu und unten ist dann alles weg.“

Diese Aussage deutet darauf hin, dass die Teilnehmenden koexistierende Vorstellungen zum Mengenerhalt ausgebildet haben.

Ein*e Teilnehmende*r beschreibt in diesem Zusammenhang, dass am Ende des Vorgangs die Energie im Stein stillgelegt werde:

tE_B*: „Dass sich halt die Höhenenergie und die Bewegungsenergie halt am tiefsten Punkt halt in die chemische Energie verwandelt, da ja die Energie jetzt nicht einfach weggenommen werden kann. Also die Energie wird halt quasi stillgelegt in dem Stein.“

Dies korrespondiert mit der Beobachtung von Solomon (1985), die diese Vorstellung auf eine Missinterpretation des Energieerhaltungssatzes zurückführt (vgl. Kapitel 2.4.2).

Auch in der Gruppe LoIR konnte eine ähnliche Äußerung zur Energieerhaltung identifiziert werden:

LoIR_D: „[...] ich glaube mehr als die Hälfte, aber ein bisschen bleibt auch noch, also, jetzt beim Stein, weil ja nach dem Aufprall ist da ja auch noch ein bisschen Bewegungsenergie da halt, aber auch nicht zu viel.“

Tabelle 49: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 2 im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 2 Erhaltung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Die Menge der Gesamtenergie ändert sich im Laufe des Prozesses.			1	0,06
	Die Energie wird am Ende des Vorgangs stillgelegt, in eine unsichtbare Form gewandelt.	1	0,06		
	Nach dem Aufprall muss dem Stein weiterhin Bewegungsenergie zugeordnet werden.			1	0,06
	Am Ende des Prozesses hat der Stein keine Energie.	6	0,39		
	Energieerhaltung gilt nur bei Wiederholung des Prozesses.	2	0,11		
	Energieerhaltung gilt nur während des Prozesses.	1	0,06		
Kognitiver Konflikt zu den Unterrichtsinhalten	Wir hatten das zwar im Unterricht, aber ich kann mir nicht vorstellen, dass die (ganze) Energie umgewandelt wird, sie wird verbraucht.			1	0,06
Lehrgangsvorstellungen	Am Ende des Vorgangs wird die Energie komplett in die Umgebung abgegeben.			1	0,06
	Die Energiemenge bleibt gleich.	4	0,22		

Aufgabe 3: Das rutschende Kind

Ein Kind sitzt oben auf einer Rutsche und möchte gleich losrutschen. Was kannst du über die Energie des Kindes sagen?

Neben Äußerungen zum Energieverbrauch beschreiben beide Gruppen im Allgemeinen, dass die Energie die ganze Zeit erhalten bleibe und sich nur umwandle. Diese Aussagen wurde der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet (vgl. Tabelle 50).

Auch hier beschreiben zwei Teilnehmende der Gruppe tE, dass die Energie nach Ende des Vorgangs gespeichert oder stillgelegt werde:

tE_B*: „[Entwertet bedeutet] halt dass die Energie halt nicht mehr da ist. Halt so ... Stillgelegt.“

tE_D***: „Dann, wenn der dann auf dem Boden irgendwie sitzt dann... dann ist es dann wieder so wie bei Aufgabe 2 da bin ich mir jetzt wieder unschlüssig, dass da wieder die Energie komplett weg ist so wie ich das bei Aufgabe 2 gemacht habe oder kann auch sein, dass es sie auch wieder irgendwo gespeichert wurde.“

Demgegenüber erläutern zwei Teilnehmende der Gruppe LoIR den Mengenerhalt der Energie in der konkreten Situation.

Tabelle 50: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 3 im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 3: Erhaltung		LoIR		LmIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Energie wird verbraucht.	1	0,06	3	0,31
	Die Energie wird am Ende des Vorgangs stillgelegt oder gespeichert.	2	0,11		
Anknüpfungsfähige Vorstellung	Die Energie muss immer eine ganze Säule ergeben.			2	0,19
Lehrgangsvorstellungen	Energie bleibt die ganze Zeit erhalten, sie wird nur umgewandelt.	3	0,17	3	0,25
	Am Ende des Vorgangs wird die Energie an die komplett an die Umgebung gegeben.			1	0,06
	Die gesamte Energie wurde in innere Energie umgewandelt.			2	0,13

Aufgabe 4a: Das Pendel ohne Motor

Ein Pendel ist an einem Motor befestigt. Du lenkst es aus und lässt es los. Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor ausgeschaltet ist?

Insgesamt konnten bei diesem Szenario in beiden Gruppen nur wenige Aussagen exzerpiert werden, die den Aspekt Erhaltung thematisieren (vgl. Tabelle 50).

In beiden Gruppen äußert ein Drittel der Teilnehmenden, dass die Energie während des Pendelns verbraucht werde:

tE_I**: „[...] *Da ist dann halt einfach nach der Zeit einfach, hat er einfach keine Energie mehr, also wird er langsamer und dann würde ich auch sagen, dass es nach einer Zeit dann keine Energie mehr gibt.*“

Jedoch lassen sich in der Gruppe LoIR im Gegensatz zur Gruppe tE vermehrt Aussagen identifizieren, die der Kategorie *Lehrgangsvorstellungen* zugeordnet werden können. Dabei handelt es sich vorwiegend um allgemeine Äußerungen zum Mengenerhalt sowie der Umwandlung von Energie.

Tabelle 50: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 4a im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 4a: Erhaltung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Naives Verständnis zum Begriff Erhaltung	Energieerhaltung meint, dass das Pendel immer weiter schwingt.			1	0,06
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Energie wird verbraucht.	4	0,28	3	0,25
Lehrgangsvorstellungen	Energiemenge bleibt die ganze Zeit erhalten, sie wird nur umgewandelt.	1	0,06	5	0,31
	Wenn es keine Reibung gäbe, dann würde es immer weiter schwingen.			1	0,06

Aufgabe 4b: motorisiertes Pendel

Was kannst du über die Energie beim Pendeln sagen, wenn der Motor eingeschaltet ist?

Nach dem Einschalten des Motors argumentieren Teilnehmende beider Gruppen zunächst eher auf alltagssprachlicher Ebene, dass das Pendel durch den Motor nicht aufhöre zu schwingen bzw. immer wieder dieselbe Höhe erreiche (vgl. Tabelle 51):

tE_A**: „[...] dann könnte das Pendel sozusagen so lange machen wie er möchte und immer hier lang gehen, also immer... immer wieder dieselbe Höhe erreichen, weil der Motor es sozusagen unterstützt einfach.“

Teilnehmende beider Gruppen erläutern aus energetischer Sicht, dass der Motor die Energie erhalte oder hinzufüge.

Das Anfertigen des zugehörigen Energiekontomodells stellt für eine*n Teilnehmende*n eine Herausforderung dar, da eine gleichbleibende Säulenhöhe unter Berücksichtigung der Entwertung nicht eingehalten werden kann. Der Widerspruch wird gelöst, indem diese*r Teilnehmende*r die innere Energie bei diesem Vorgang nicht berücksichtigt:

tE_E***: „Ähm Energieerhaltung.... Diese elektrische Energie ähm es ist ja auch wenn das hier eine etwas verwirrende Situation ist schon so dass man... Ich würde also ist es immer 100 % Energie da, wenn man aber nicht, wenn man nicht die entwertete Energie dazu zählt.“

Daraus folgert diese*r Teilnehmende, dass die Energiemenge hier zunehmen muss:

tE_E***: „Also, die Energie bleibt natürlich erhalten und würde dann halt hier umgewandelt wird dann aber auch entwertet und diese Energie, die von der Steckdose kommt, wird auch die ganze Zeit erhalten und dann da rein fließen.“

Auch in der Gruppe LoIR äußert sich ein*e Teilnehmende*r über einen Energietransfer in das System und beschreibt, dass der Motor die Energie „regeneriere“, sodass Höhen- und Bewegungsenergie wieder eine ganze Säule ergeben würden.

Dem überwiegenden Teil der interviewten Schülerinnen und Schüler können jedoch keine bzw. wenige Aussagen zum Energieerhalt zugeordnet werden, die zur Kategorie *anknüpfungsfähige* bzw. *Lehrgangsvorstellungen* gehören.

Tabelle 51: Identifizierte Aussagen im Rahmen von Aufgabe 4b im Zusammenhang mit dem Aspekt Erhaltung.

Aufgabe 4b: Erhaltung		tE		LoIR	
Kategorie	Aussage	#P	mAG	#P	mAG
Alltagssprachgebrauch/ Erfahrungswissen	Durch den Motor hört das Pendel nicht auf zu schwingen,			5	0,50
	durch den Strom.			2	0,13
	Durch den Motor erreicht da Pendel wieder dieselbe Höhe.	7	0,5		
	Durch den Motor hat das Pendel überall dieselbe Geschwindigkeit.			1	0,06
	Durch die Erwärmung geht der Motor kaputt.			1	0,06
	Der Motor treibt das Pendel mit elektrischer Energie an.	5	0,33		
Kognitiver Konflikt	Wenn die innere Energie berücksichtigt wird, dann ist es mehr als eine Säule, das darf nicht sein.	1	0,06	1	0,13
Nicht anknüpfungsfähige Vorstellung	Energie wird verbraucht.			3	0,19
Anknüpfungsfähige Vorstellung	Der Motor erhält die Energie.	2	0,11	3	0,19
	Die Energie bleibt erhalten.			3	0,19
Lehrgangsvorstellungen	Der Motor fügt Energie hinzu.	3	0,22	2	0,19
	Der Motor regeneriert die Energie, sodass Höhen- und Bewegungsenergie wieder eine ganze Säule ergeben.			1	0,13
	Die Energiemenge nimmt zu.	1	0,11		

D.2. Übersicht: Analyse der Energietestdaten über die Messzeitpunkte T0, T1 und T2 für Entwertung und Erhaltung der Gruppen LoIR und LmIR+

Gruppe	Messzeitpunkte	Aspekt	<i>z</i>	<i>p</i>	<i>d</i>
Lehrgang ohne IR	T0 zu T1	Entwertung	-3,267	.003	0,45
	T1 zu T2	Entwertung	-4,753	.000	0.67
	T0 zu T2	Entwertung	-8,020	.000	1.27
	T0 zu T1	Erhaltung	-1,535	.375	
	T1 zu T2	Erhaltung	-0,941	1.00	
	T0 zu T2	Erhaltung	-2,475	.040	0.45
Lehrgang mit IR+	T0 zu T1	Entwertung	-3,693	.001	0.49
	T1 zu T2	Entwertung	-6,050	.000	0.85
	T0 zu T2	Entwertung	-9,742	.000	1.60
	T0 zu T1	Erhaltung	-0,904	1.000	
	T1 zu T2	Erhaltung	-5,146	.000	0.70
	T0 zu T2	Erhaltung	-6,050	.000	0.85

E. Übersicht: Aspekte der Energiequadriga in den Lehrplänen der Bundesländer

Bundesland	Quellen/ Formen	Umwandlung	Transfer	Entwertung	Erhaltung	Wärme und Temperatur
Schleswig-Holstein	7	10	7	10	10	7
Mecklenburg-Vorpommern*	7/9	7/9	7/9	7/9	7/9	7/9
Bremen*	5/6 In NW 7/8	5/6 In NW 7/8	9	–	10	–
Hamburg	7/8	7/8	7/8	(7/8) ⁷⁷ expl. in 9/10	7/8	–
Sachsen	7	7	8	9	9	8
Berlin; Brandenburg						
Niedersachsen	7/8	7/8	7/8	(7/8) ⁷⁷ expl. in 9/10	7/8	9/10
Sachsen-Anhalt	(7/8) ⁷⁸ expl. in 9	7/8	7/8 ⁷⁹	–	7/8	7/8
Saarland	8	8	8	(8) ⁷⁷ expl. in 9	8	8
Baden-Württemberg	7/8	7/8	7/8	7/8 ⁷⁷	7/8	9/10
Bayern	8	8	8	– ⁸⁰	8	8
Thüringen**	Bekannt aus NW Auch in 8	Bekannt aus NW Auch in 8	8	–	8	8
Hessen	7/8	9/10	7/8	7/8	9/10	9/10
Nordrhein-Westfalen	5/6	5/6	5/6	–	7/9	5/6
Rheinland-Pfalz*	7	9	8	(7) ⁷⁷	7	8

() keine explizite Nennung; – Keine Nennung, auch nicht im Zusammenhang mit der Umwandlung oder dem Transfer von Energie

NW: Unterrichtsfach Naturwissenschaften

* Physik ab JG 7; ** Physik ab JG 8; *** Physik ab JG 6

⁷⁷ Implizit beschrieben durch den „Energiefluss in die Umgebung“

⁷⁸ Implizit durch die Nennung der Energieumwandlung im elektrischen Stromkreis, benannt wird hier nur innere Energie

⁷⁹ Beschrieben durch Arbeit und Wärme

⁸⁰ Gesprochen wird von „Leistung/Wirkungsgrad und einem „Perpetuum mobile“

Danksagung

Meinen großen Dank möchte ich meiner Doktormutter Jun. Prof. Dr. Susanne Weißnigk aussprechen, die mich während meiner Promotionszeit mit viel Engagement stets kompetent und konstruktiv beraten sowie durch intensive Diskussionen gefördert und gefordert hat. Dies war für meine Arbeit und für mich persönlich von unschätzbarem Wert.

Des Weiteren möchte ich mich sehr herzlich bei Prof. Dr. Jeffrey Nordine sowie Prof. Dr. Andreas Nehring für die Übernahme des Korreferats bedanken.

Ebenso gilt mein Dank meinen Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe, die mich auf vielfältige Weise unterstützt haben und mir zur Seite standen. Vielen Dank für die schöne Zeit.

Den Kolleginnen und Kollegen der Ricarda-Huch-Schule danke ich sehr für ihre uneingeschränkte Unterstützung bei der Durchführung meiner Studie, ihr Interesse und Verständnis.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich immer bestärkt haben und mir Halt geben.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen, als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Außerdem versichere ich, dass ich die allgemeinen Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit und Veröffentlichung, wie sie in den Richtlinien der Leibniz Universität Hannover zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis festgelegt sind, befolgt habe.

Unterschrift:

Datum:

Lebenslauf

Larissa Greinert

Goebenstraße 1

30161 Hannover

larissa.greinert@gmx.de

geboren am 21. Januar 1987

in Nienburg/Weser

Berufstätigkeit

Seit 08/2013	Studienrätin am Gymnasium Ricarda-Huch-Schule Hannover für die Fächer Physik und Mathematik
08/2016-07/2019	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Mathematik und Physik, AG Physikdidaktik
01/2012-07/2013	Referendarin für das Lehramt an Gymnasien am Studienseminar Hannover II

Hochschulausbildung

Seit 08/2016	Promotionsstudentin an der Leibniz Universität Hannover
10/2009-09/2011	Masterstudium an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg 1. Fach: Mathematik, 2. Fach: Physik
10/2006-09/2009	Zwei-Fächer Bachelorstudium an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg; 1. Fach: Mathematik, 2. Fach: Physik

Schulbildung

08/1999-05/2006	Albert-Schweitzer-Gymnasium Nienburg
-----------------	--------------------------------------

Publikationen

- Greinert, L. & Weßnig, S. (2020, im Druck). Unsichtbares sichtbar machen! Interpretation von Wärmebildern mit Hilfe eines WBK-Führerscheins. *Digital Unterrichten Biologie*, (1), 8–9.
- Greinert, L. & Weßnig, S. (2019). Energieentwertung mit der IR-Kamera – Studie zum Einfluss der IR-Kamera auf das Energieverständnis in einem curriculumorientierten Lehrgang mit Fokus auf Energietransfer. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10(2), 241. <https://doi.org/10.1007/s40573-019-00102-w>
- Greinert, L. & Weßnig, S. (2017). Infrarotkameras zur Erweiterung der Sinneswahrnehmung Sehen. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze & J. Groß (Hrsg.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen. Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (S. 161–176). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.
-

Tagungen

März 2019	DPG-Frühjahrstagung Aachen Poster: Smartphone Infrarotkameras: Energietransfer sichtbar machen
September 2018	Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik in Kiel Vortrag: Energieentwertung erfassbar machen - Ein Lehrgang in informeller und formeller Lernumgebung
Februar 2018	GDCP Schwerpunkttagung „Energie“ Vortrag: Energieentwertung im Fokus
Oktober 2017	Doktorierendenkolloquium der GDCP in Essen Vortrag: Energieentwertung sichtbar machen mit der Infrarotkamera
September 2017	Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik in Regensburg Poster: Energieentwertung sichtbar machen mit der Infrarotkamera

Projekte und Tätigkeiten

08/2016-08/2019	Lehrtätigkeit an der Leibniz Universität Hannover: Leitung von Übungen und Seminaren (u. a. Lehren und Lernen von Physik, Begleitseminar zum Fachpraktikum Physik, Blockpraktikum). Betreuung und Begutachtung von Qualifikationsarbeiten.
2013/2014/2015	Mitarbeit in der SAILS- Arbeitsgruppe, Posterpräsentation im Rahmen der SMEC in Dublin (2015)
2009/2010/2011	Jugend Forscht – Schüler Experimentieren, Landeswettbewerb Organisation und Durchführung des Wettbewerbs; Betreuung der Teilnehmer
