

Lösungsstrategien im Physikunterricht

Andrea Kück*, Hans-Otto Carmesin^{+,*}

*Max-Eyth-Schule, Jierweg 20, 27619 Schiffdorf, ⁺Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade, [~]Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Str. 40, 21680 Stade, [~]Universität Bremen, Postfach 28334
andrea.kueck@mes-portal.de, Hans-Otto.Carmesin@t-online.de

Kurzfassung

Eine der wichtigsten zu erlernenden Kompetenzen und gleichzeitig auch Ziel des Physikunterrichts ist das Lösen von realen, physikalischen Problemstellungen. Oftmals wird die Strategie zum Lösen des Problems eher unbewusst erlernt und angewandt, so dass die Lernenden die Problemstellungen meist intuitiv lösen. Zur Steigerung der Problemlösefähigkeit sollten diese jedoch bewusst angeeignet werden. Aus pragmatischer und neurowissenschaftlicher Sicht werden Denk- und Handlungsmuster betrachtet. Des Weiteren werden die grundlegenden Heuristiken (d.h. die Kunst des Problemlösens) in den fächerübergreifenden Strategien, den fachspezifischen Prinzipien und den situationsspezifischen Hilfsmitteln vorgestellt. Wir schildern unsere Erfahrungen aus dem Unterricht und stellen die Ergebnisse eines Modultages vor.

1. Ausgangssituation

„Ich weiß nicht, wie ich anfangen soll!“ ist eine häufig von Schülerinnen und Schülern (SuS) im Physikunterricht gehörte Aussage. Diese spiegelt deutlich die Problematik des lediglich unbewussten Anwendens von Lösungsstrategien wider. Sind sie einem nicht präsent, kann auch keine gewählt werden, um mit dem Lösen zu beginnen.

1.1. Motivation

In der aktuellen Unterrichtssituation haben intuitive Problemlöser meist das Glück, dass sie erfahrungsbasiert die erforderlichen Voraussetzungen mitbringen. Nicht-intuitive Problemlöser sind an dieser Stelle benachteiligt, da diese oft nicht den Grund ihrer Schwäche erkennen und sehr selten ihre Vorgehensweise reflektieren. Kennst du auch noch den extra fleißigen Klassenkameraden, der trotz aller Anstrengung stets nur 2er schrieb und nicht in den verdienten Genuss einer Bestnote kam? Dieselbe Aufgabe kann für jeden einzelnen aufgrund unterschiedlicher Startvoraussetzungen verschieden schwer zu lösen sein. An dieser Stelle ist die Lehrkraft in der Pflicht den Unterricht geeignet zu gestalten, um mehr Gerechtigkeit für alle Lernenden zu schaffen.

Unsere Erfahrungen aus dem Schulalltag zeigen, dass auch die intuitiven Problemlöser nicht das komplette Spektrum an Lösungsstrategien nutzen. Das bewusste Anwenden wird ebenfalls selten bei diesen SuS beobachtet. Ein Grund hierfür könnte sein, dass Metakognition im Allgemeinen bei ihnen noch nicht im Fokus steht. Folglich ist es auch für diese Schülergruppe interessant weitere Strategien zu erlernen und diese bewusst einzusetzen, um ihre Problemlösekompetenz zu steigern.

Die Lehrpläne, wie z.B. das Kerncurriculum (KC) in Niedersachsen [1], fordern das Unterrichten der Problemlöse-Kompetenz. Hierunter werden die

Phasen von der Problemanalyse, über das Aufstellen einer Lösungsstrategie bzw. -weges, über das Durchführen des Lösungsweges, bis zur (Selbst-) Überprüfung der erhaltenen Ergebnisse mit Reflexion verstanden. Jedoch ist das Unterrichten von Heuristiken bzw. Lösungsstrategien nicht explizit im KC vorgesehen. Dieses ist wahrscheinlich auch ein Grund zur Nichtbeachtung bei der Stundenplanung vieler Lehrkräfte. In den Unterrichten zeigte sich, dass den Lernenden die Findung einer geeigneten Lösungsstrategie die meisten Schwierigkeiten bereitet. Ist diese erst einmal geklärt, können die restlichen Aspekte bearbeitet werden. Wir sehen es aus den oben genannten Gründen als Mangel an, dass Lösungsstrategien oftmals nicht konkret unterrichtet und den Lernenden bewusst gemacht werden.

1.2. Unsere Ziele

Unser übergeordnetes Ziel ist es, den SuS das Erlernen und Anwenden von Lösungsstrategien zu ermöglichen sowie die Lernbarrieren, -blockaden und Ängste abzubauen. Es gilt zu diskutieren welche Strategien zu unterrichten sind und welche Form sinnvollerweise gewählt werden sollte.

Wie bereits im Allgemeinen aus den Berufsschulen und weiterführenden Schulen bekannt ist, benötigt das Entwickeln von prozessbezogenen Kompetenzen stets einen längeren Zeitraum, d.h. die Problemlösekompetenz sollte innerhalb von Unterrichtssequenzen immer wieder gefördert werden. Auf der anderen Seite scheint es effizient Neues im Ganzen am Block zu lernen, um Übersicht zu schaffen und Orientierung zu geben. Deshalb haben wir uns entschieden zu testen, ob die Einführung der Lösungsstrategien an einem Modultag sinnvoll ist. Die Intention des Modultages ist es bei den SuS die Neugier zu wecken und Einsicht zu erzeugen. Es sollte nicht versucht werden das komplette Spektrum an Strategien abuarbeiten oder die Strategien von den Ler-

nenden entwickeln zu lassen, da dieses innerhalb eines Tages nicht erreicht werden kann.

1.3. Begriffe

Mit dem Begriff Lösungsstrategie ist eine Methode zur Vorgehensweise zum Lösen des Problems gemeint. Es geht folglich darum welche Gedankenschritte vollzogen werden müssen, um zur Lösung zu gelangen. Deshalb nutzen wir ebenfalls den Begriff Denkstrategien. Vorteilhaft bei der Verwendung des Begriffs Denkstrategie ist ferner, dass sich die SuS unter diesem leichter etwas vorstellen können. Diese beiden Bezeichnungen werden hier ebenso als übergeordneter Titel für die gesamten Strategien, Prinzipien und Hilfsmittel genutzt, s. Abb. 1. Die Begriffe Strategie, Prinzip und Hilfsmittel werden im Kapitel 3.2 näher erläutert.

Lösungsstrategie bzw. Denkstrategie		
Strategie -> fächerübergreifend	Prinzipien -> fächerspezifisch	Hilfsmittel -> situationsspezifisch

Abb.1: Übersicht der verwendeten Begriffe

2. Grundlagen

Die Schwierigkeit des Problemlösens ist keine neue und auch keine Problematik unserer Zeit. Das Entwickeln und Anwenden von Lösungsstrategien ist ebenfalls keine moderne Erfindung. Dieses wird uns bereits in die Wiege gelegt. Aus neurodidaktischer Sicht gibt es zwei wesentliche angeborene Lernmechanismen, wie wir etwas Neues erlernen können. Das ist zum einen das Nachmachen und zum anderen das Problemlösen. Gross legt in ihrer Arbeit dar, dass bereits Neugeborene diesen Mechanismus, für welchen sehr wahrscheinlich die Spiegelneuronen entscheidend sind, nutzen. [2] Ebenso ist das Problemlösen – das Ausbilden von Metakompetenzen – bereits in unserer Kindheit angelegt. [3, 4]

2.1. Stand des Wissens

Der Begriff der Heuristik meint die Kunst des Problemlösens. Bereits im 4. Jahrhundert entwickelte der griechische Mathematiker Pappos von Alexandria eine Methode zur Lösung von Problemen: 1. Betrachte das Problem als gelöst; 2. Suche den Lösungsweg durch Rückwärtsschreiten (Analyse); 3. Beweise durch Vorwärtsschreiten (Synthese), dass dieser Weg zur Lösung führt. [5] Bei dem dreischrittigen Vorgehen wird deutlich, dass Pappos eine Strategie aufzeigt, die er sich erarbeitet hat. Es konnte im Unterricht häufig beobachtet werden, dass intuitive Problemlöser ihr Spektrum an intuitiven Lösungsstrategien nicht wahrnehmen. Sie stellen, vermutlich auch wie Pappos, nur die erfahrungsbasierten in den Fokus.

In der Mathematik finden sich einige Publikationen zum Bereich der Heuristik. Bereits in den 40er Jahren beschäftigte sich zum Beispiel der Mathematiker Georg Pólya mit der Frage, wie man die Lösung sucht. Pólya prägte durch seine fundamentalen Arbeiten das Gebiet der Heuristik entscheidend. In seinem Buch **Die Schule des Denkens** stellt er seine

vier erarbeiteten Grundschriffe vor: 1. Verstehen der Aufgabe; 2. Ausdenken eines Plans; 3. Ausführen des Plans; 4. Rückschau halten. Jeder Phase ordnet Pólya eine Frage zu, um dem Lernenden die Durchführung der einzelnen Schritte zu erleichtern. Die Fragen zur zweiten Phase, das Finden der Lösungs-idee, verdeutlichen, dass hier bereits mit Lösungsstrategien gearbeitet wurde: Hast du die Aufgabe schon früher gesehen?; Betrachte die Unbekannte!; Kannst du die Aufgabe anders ausdrücken?; Hast du alle Daten benutzt?. 1957 erwähnte er einmal, dass es viele angemessene Wege gibt ein Problem zu lösen und dass die Fähigkeit eine geeignete Strategie zu finden am besten durch Üben verbessert werden kann. Als mögliche Strategien schlägt er beispielsweise vor: Rate und überprüfe; Schließe Möglichkeiten aus; Nutze Symmetrien; Löse eine Gleichung; Zeichne ein Bild; Arbeite rückwärts; Löse ein einfacheres Problem; Sei genial! [6]

Jüngere, bekannte Arbeiten zum Unterrichten von Heuristiken verfassten unter anderem Regina Bruder und Christina Collet. Sie legten mit ihren Arbeiten eine Basis für den modernen Mathematikunterricht. [7,8] Erprobt wurden die Unterrichtsmethoden in einem mehrjährigen Projekt hauptsächlich in der Sekundarstufe 1. Sie unterscheiden zwischen Strategien (z.B. Vorwärtsarbeiten, Rückwärtsarbeiten, systematisches Probieren), Prinzipien (z.B. Zerlegungsprinzip, Analogieprinzip) und Hilfsmitteln (z.B. informative Figur, Tabelle) und gehen beim Lehren der Heuristiken in fünf Schritten vor: 1. Gewöhnen an Heuristik; 2. Bewusstmachung (Methoden); 3. Bewusstes Üben; 4. Kontext-erweiterung; 5. Eigenes Problemlösemodell entwickeln. Ein wesentliches Merkmal von Bruder und Collet ist die Feststellung, dass Problemlösen bedeutet, die richtigen Fragen zu stellen. Der Erfolg dieses Trainingskonzepts spiegelt sich beispielsweise im SINUS-Programm wieder. Der Studie folgte ein Transfer-Programm, wodurch die Unterrichtsmethode deutschlandweit verbreitet wurde. [9]

Im Bereich der Physik sind bereits von jeher Lösungsstrategien implementiert, z.B. das Analogieprinzip, das Invarianzprinzip oder auch das Transformationsprinzip. In der Physikdidaktik konnten nur sehr wenige Hinweise auf das bewusste Entwickeln und Anwenden von Lösungsstrategien gefunden werden. Eine Reihe an Veröffentlichungen gibt es zum Lehrverfahren Problemlösen, z.B. von Martin Bruch. Hierbei geht es darum die aktuellen pädagogischen und didaktischen Ansätze des Problemlösens auf das Unterrichtsfach Physik anzuwenden und zu diskutieren. Der Schwerpunkt liegt im Unterrichtsaufbau zur Verbesserung der Problemlösefähigkeit. Das konkrete Unterrichten von Lösungsstrategien wird indirekt knapp aufgegriffen. Er erwähnt, dass die größte Schwierigkeit in der Fähigkeit zur Metakognition besteht. Laut Bruch ist die Fähigkeit Fragen zu stellen grundlegend. Zum Lösen werden drei Phasen (Worum geht es?; Gibt es Vorwissen?;

Strategiegeleitetes Ausprobieren) dargestellt und beispielsweise folgende Strategien aufgeführt: Mögliche Strategien: Annahmen und Kriterien wechseln, Gegebenheiten umstrukturieren, Gedankengänge oder Problemlöseschritte umkehren, verschiedene Aspektbetrachtungen zulassen. [10, 11]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sehr wenige Materialien zum Thema Lösungsstrategien im Physikunterricht zu finden sind. Der aktuelle Forschungsstand verdeutlicht die Lücke. Wie internationale Vergleichsstudien, z.B. PISA und TIMSS, zeigen, benötigen die SuS jedoch eine Anregung zur Steigerung ihrer Problemlösekompetenz, um effiziente Problemlöser zu werden. Ohne eine Bewusstmachung kann dieses vermutlich nur bedingt gelingen. Die Ergebnisse des SINUS-Programms und des SINUS-Transfers zeigen für den Mathematikunterricht, dass sich das bewusste Erlernen von Lösungsstrategien positiv auf die Problemlösefähigkeit auswirkt. [9]

Erste Vorarbeiten im Physikunterricht zeigt die Hausarbeit **Entwickeln und Anwenden von Lösungsstrategien**, welche sich mit dem Unterrichten von Lösungsstrategien befasste. Hierbei wurden im Mathematikunterricht bereits erfolgreich erprobte Heuristiken auf den Physikunterricht übertragen und die Metaebene in den Fokus gesetzt. Es handelt sich um die Lösungsstrategien Vorwärts, Rückwärts, systematisches Probieren und Mathematisieren. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die zentralen Aspekte für ein Gelingen die **Aufgabenstellung im passenden, sinnstiftenden Kontext** sowie **geeignete Lernhilfen** sind. [14]

2.2. Erkenntnisleitende Fragestellung

Es stellt sich die Frage, warum die Anzahl an veröffentlichten Arbeiten so gering ist. Dieses könnte zum einen daran liegen, dass dieses Gebiet noch wenig erforscht ist. Diese Begründung wäre plausibel, da die Implementierung im Matheunterricht noch jung ist. Oder aber erste Ansätze zeigten recht früh, dass das Erlernen von Lösungsstrategien in der Physik nicht sinnvoll ist und es wurde nichts publiziert, da meist nur positive Ergebnisse öffentlich gezeigt werden. Somit ergibt sich die erste Leitfrage für diese Arbeit: **Ist das bewusste Erlernen von Lösungsstrategien in Physik sinnvoll?**

Zur Beantwortung der ersten Fragestellung ist eine praktische Erprobung im Unterricht erforderlich, deren Umsetzung zu diskutieren ist. Zunächst ist eine geeignete Form zu wählen. Es gilt abzuwägen, ob die Lösungsstrategien wie bisher über eine oder mehrere Unterrichtssequenzen hinweg oder an einem Modultag beigebracht werden sollen. Vorteilhaft bei der Durchführung an einem Modultag wäre, dass den Lernenden ohne zeitlichen Stress, abseits des Schulalltags, eine Gesamtübersicht und ein struktureller Aufbau gezeigt werden könnten. Die Gesamtübersicht sowie der gut strukturierte Input sind essentielle Grundvoraussetzungen zum Lernen.

„Nichts ist schädlicher als chaotischer Input, denn sofern der Input keine Regelmäßigkeit aufweist, können keine Regeln extrahiert werden, kann also nichts gelernt werden.“ [13] Es wird vermutet, dass sich dieses effizienter während eines Modultags umsetzen lässt. Somit resultiert hieraus die zweite Leitfrage: **Eignet sich ein Modultag zur Einführung der Lösungsstrategien?**

3. Material und Methoden

3.1. Evaluation

Zur Beantwortung der erkenntnisleitenden Fragestellung werden ein Vorher-Nachher-Vergleich (Kompetenzraster) sowie verschiedene Evaluationen mit unterschiedlichen Schwerpunkten angesetzt. Der erhoffte Erkenntnisgewinn je Leitfrage ist in Tab. 1 zu finden. Ebenso sind in dieser Tabelle die Bedeutungen für den Fall, dass die Tendenz positiv ausfällt, entsprechend den Leitfragen notiert. Eine Tendenz wird als positiv angenommen, wenn 70 % und mehr, der SuS, **Trifft teilweise zu** und besser angekreuzt haben. Die Evaluation wird in Anlehnung an die Kriterien von Balzer durchgeführt. [14] Zur Verifizierung werden die Ergebnisse der Schüler-Evaluation mit den Einschätzungen der durchführenden Lehrkräfte und der Beobachter verglichen. Die zu erarbeitenden Übersichtslisten stellen das Grundgerüst für die SuS dar und schaffen Struktur für eine gute Lernwirksamkeit.

Evaluation	Erkenntnisgewinn zu Leitfrage 1:	Erkenntnisgewinn zu Leitfrage 2:
Vorher-Nachher-Vergleich (Kompetenzraster)	Lernende schätzen selbst, ob es eine Kompetenzsteigerung gab > falls Tendenz positiv > Indiz für Sinnhaftigkeit	Selbsteinschätzung der Lernenden zur Kompetenzsteigerung > falls positiv > Kompetenzzuwachs am Modultag möglich
Allgemeine Kurs-evaluation	Interesse der Lernenden > falls Tendenz positiv > Indiz für Sinnhaftigkeit	Interesse (Lernenden) > falls Tendenz positiv > Indiz für Modultag
Inhaltliche Evaluation	Einschätzung d. erworbenen inhaltsbezogenen Kompetenz > falls Tendenz positiv > Indiz für Sinnhaftigkeit	Einschätzung d. erworbenen inhaltsbezogenen Kompetenz > falls Tendenz positiv > Indiz für Modultag
Zukünftige Nutzung	> falls Tendenz positiv > Erzeugung von Einsicht möglich > Indiz für Sinnhaftigkeit	> falls Tendenz positiv > Erzeugung von Einsicht möglich > Indiz für Modultag
Feedback: Lehrkräfte/ Beobachter	Vergleich mit Schüler-Evaluation > Übereinstimmung der Ergebnisse > Indiz für Plausibilität der Schülerevaluation	

Tab.1: Zu erwartender Erkenntnisgewinn pro Evaluation und Leitfrage.

3.2. Übersichtslisten

Zunächst ist eine klare Einteilung in die Kategorien Strategie, Prinzipien und Hilfsmittel vorzunehmen. Die Einteilung wird anhand der nachfolgenden Kriterien vorgenommen: fächerübergreifende (nicht-inhaltliche) Strategien, fächerspezifische (inhaltliche) Prinzipien und situationsabhängige Hilfsmittel. Hieraus soll eine Übersichtsliste pro Kategorie resul-

tieren. Zu den in der Übersichtsliste aufgeführten Aspekten ist, wenn möglich, die Lernwirksamkeit nach Hattie [15] zuzuordnen, welche in der Effektstärke d gemessen wird. Um den SuS die Einordnung in diese Kategorien zu erleichtern und die Anwendung zu verdeutlichen, wird die Analogie Getränkeke-Flasche-Öffner herangezogen. Zur Entwicklung einer Lösungsstrategie ist z.B. eine Getränkeke (= eine Strategie), eine Flasche (= Prinzip) und ein Öffner (= Hilfsmittel) zu wählen. Zur Erhöhung des Wiedererkennungswertes wird ein Farbschema genutzt: **Strategien: blau, Prinzipien: grün und Hilfsmittel: rot.**

3.3. Planung der Durchführung

Für den Modultag wurden zwei Lerngruppen des Beruflichen Gymnasiums (BG) der 11. Jahrgangsstufe mit insgesamt 41 SuS gewählt. Eine Lerngruppe entstammt dem Beruflichen Gymnasium mit dem Schwerpunkt Gesundheit/Pflege (kurz: GPLer) und die andere dem Beruflichen Gymnasium mit dem Schwerpunkt Technik (kurz: Techniker). Zunächst mögen die Berührungspunkte zwischen den GPLern und dem Gebiet der Problemlösung sehr gering erscheinen, jedoch gibt es ebenso z.B. in der Biologie fachspezifische Lösungsprinzipien. Des Weiteren wird mit der Stärkung der eigenen Problemlösekompetenz nicht nur die Leistung in einem Fach verbessert, sondern die SuS eignen sich allgemeine Denkstrategien an und werden geistig beweglicher. Diese Fähigkeiten können in allen Bereichen des Lebens genutzt werden. Es wurde die 11. Jahrgangsstufe gewählt, da diese sich am Beginn der Einführungsphase befindet und hier gleich die Grundlagen für eine gute Problemlösekompetenz angelegt werden soll. Für den Modultag werden neben dem Fach Physik Fächer mit physikalischen Inhalten wie Technik (hier Alltagswissen genannt, um die Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit zu unterstreichen) gewählt. Als Gegenstück wird für die GPLer das Fach Biologie mit aufgenommen. Es wird sich ferner für das Fach Mathematik entschieden, da es hier bereits in der Literatur gut beschriebene Vorgehensverfahren gibt. Die Inhalte der Aufgaben sind an die aktuelle Studententafel angelehnt, damit im folgenden Unterricht auf den Modultag aufgebaut werden kann. Es soll ein kumulativer Kompetenzaufbau in Anlehnung an die fünf Phasen von Bruder und Collet erfolgen [7]. Am Modultag selbst wird vorwiegend die erste Phase **Gewöhnen an Heuristik**, in der Gruppenarbeit ebenso die zweite **Bewusstmachung (Methoden)** und die dritte Phase **Bewusstes Üben** angestrebt. Das Material der Einführungsrunde sowie der Gruppenarbeiten kann unter folgendem Link eingesehen werden: hans-otto.carmesin.org

3.4. Umsetzung

Die Umsetzung des Modultages wird wie im Folgenden beschrieben realisiert. Begonnen wurde mit einer kurzen Begrüßung. Um Interesse und Betroffenheit bei den Lernenden zu erzeugen, wurde die

oben bereits beschriebene Problematik der nicht-intuitiven Problemlöser aufgezeigt. Im Anschluss wurde im Einführungsvortrag anhand spannender Beispiele die Denkstrategien des James Bond vorgestellt, damit die SuS eine Idee für die Leistungsfähigkeit guter Problemlöser erhalten. Der Vortrag wurde mit neurowissenschaftlichen Erklärungen, warum jedem diese Fähigkeit angeboren ist, abgeschlossen. Hiermit sollte einerseits erreicht werden, dass die Lernenden sich nicht von vornherein mit dem Argument „Das konnte ich sowieso noch nie!“ verschließen. Andererseits sollte hiermit erreicht werden, dass die Lernenden ihr bisheriges Wissen in Bezug auf die neuartige Herausforderung aktivieren. Dabei sollten sie sich selbst konkrete, passende Fragen vorstellen sowie die drei Gruppen von Lösungsstrategien einsetzen, s. Abb. 1. Somit sollten die Lernenden den angeborenen Vorgang des transferierenden Abrufens aus dem Langzeitgedächtnis bewusst gestalten. In den folgenden Gruppenarbeiten werden nun verschiedene Lösungsstrategien an fächerbezogenen Anwendungsbeispielen selbst angewendet. Hier sollen durch Selbstkompetenzerlebnisse Motivation und Einsicht erzeugt werden. Während der Abschlussrunde wird der Modultag zusammengefasst und die Evaluationsbögen für die spätere Auswertung ausgefüllt.

4. Ergebnis und Diskussion

Der Ergebnisteil gliedert sich in zwei Unterpunkte:

1. Übersichtslisten der Lösungsstrategien
2. Evaluation des Modultags

4.1 Übersichtslisten

Herausgearbeitet wurden die wesentlichen Strategien, Prinzipien und Hilfsmittel, siehe Tab. 2- 4. Laut den durchführenden Lehrkräften und den Beobachtern ist die Einteilung nach diesen Kriterien hilfreich sowie das Unterrichten der Getränkeke-Analogie sinnvoll. Die Übersichtslisten sollen den SuS eine Struktur geben und Transparenz erzeugen. Jedoch wurden diese vermutlich aufgrund der knapp bemessenen Gruppenzeit nur oberflächlich genutzt.

Die Zuordnung der Lernwirksamkeit nach Hattie [15] zeigt, dass diese im Vergleich zu den weiteren von Hattie untersuchten Aspekten überdurchschnittlich hoch sind. Das Problemlösen an sich, ohne die nähere Betrachtung von Denkstrategien, hat nach Hattie lediglich eine Lernwirksamkeit von 0,61. Das bedeutet, dass die Lernwirksamkeit je nach Lösungsstrategien bis zu über 100 % gesteigert werden kann. Es gilt zu beachten, dass nicht für alle Aspekte Literaturwerte gefunden werden konnten. Eine Effektstärke $< 0,4$ gilt als pädagogisch unbedeutend.

In Anlehnung an die Übersichtslisten wurde eine Strategiesammlung für die Lernenden erstellt. In dieser sind die Strategien verdichtet dargestellt, ähnlich wie Formeln in einer Formelsammlung. Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, gehört zum effektiven Problemlösen die Fähigkeit Fragen zu stellen und dadurch Wissen transferierend abzurufen.

fen. Aus diesem Grund sind in der Strategiesammlung die jeweils entsprechenden Fragen mit notiert. Ferner wird zu jedem Aspekt mindestens ein Beispiel aufgezeigt, um die Anschaulichkeit zu erhöhen, da die SuS leichter am Beispiel lernen [13]. Aufgrund der kurzen Gruppenarbeitszeiten konnte die Strategiesammlung nicht erschöpfend eingesetzt werden.

Strategie	d
Kreativitätsförderung via Zweck	1,44 ⁴
Metakognition	0,69
Vorwärts-Rückwärts-Denken	1,48 ¹
Systematisches Probieren	
Analogie	1,32 ²
Fragen stellen	0,9
Analyse, Synthese	
Steigerung	
Invarianz	
Elementarisierung	1,48 ¹
Modellierung	
Verallgemeinerung	1,48 ¹
Perspektivwechsel	1,48 ¹
Symmetriestrategie	
Grenzen erkunden	
Transformationsstrategie	
Rückführungsstrategie	1,48 ¹

¹Vernetzen mit Bekanntem; ²Erkennen von Bekanntem; ³Graph; ⁴Kreativitätsförderung via Zweck

Tab.2: Strategien [-> Getränkekeiste], Lernwirksamkeit in Effektstärke d [15]: **Fachübergreifend (nicht inhaltlich)**

Prinzip	d
Wärme-Kraft-Maschine, Versuch + Technik	
Feld-/Kraftgleichung: Induktionsgesetz	
Feld-/Kraftgleichung: Motor-Generator-Prinzip	1,32 ²
Bewegungsgleichungen ($F = m \cdot a$)	
Einstein-Gleichung, schülergerecht	1,32 ²
Skizzen, Dimensionsseparation, Versuch	1,24 ³
Lösungen: Ähnlichkeit, Strukturgleichheit	1,48 ¹ ; 1,32 ²
Lösungen: Feldlinien, Bahnen	1,24 ³
Vernetzung mit Sinnen: Versuch/Unmittelbarkeit/Bionik	1,48 ¹
Struktur-Funktions-Prinzip, Versuch	1,32 ²
Hypothese und Versuch	1,1 ⁴
Spektralanalyse, Versuchsauswertung	1,32 ²
Schrödinger-Gleichung, schülergerecht	
Drehimpulserhaltung	1,32 ²
Massenerhaltung	
Energieerhaltung	
Impulserhaltung	

¹Vernetzen mit Bekanntem; ²Erkennen von Bekanntem; ³Graph; ⁴Kreativitätsförderung via Zweck

Tab.3: Prinzipien [-> Flasche], Lernwirksamkeit in Effektstärke d [15]: **Fachspezifisch (inhaltlich)**

Im Laufe der Auswertung des Modultags stellte sich ein weiterer Aspekt zur Aktivierung der Denkstrategien bei den SuS heraus. Mithilfe spezieller Lernspiele im Physikunterricht könnten die Lernenden angeregt werden fast mühelos während des Spielverlaufs Lösungsstrategien anzuwenden und zu trainieren. Das Lernspiel dient folglich für die Lernenden als situationsspezifisches Hilfsmittel und für die Lehrkräfte als Lernmaterial. In Tab. 4 sind die wesentlichen Arten von Lernspielen aufgelistet. Zu jedem Spiel ist ein Beispiel mit den Ausgangsaspek-

ten und dem jeweiligen Erkenntnisgewinn aufgeführt. Es konnten keine passenden Literaturhinweise auf die Lernwirksamkeit von Lernspielen im Physikunterricht gefunden werden. Die Effektstärken, welche in Tab. 4 aufgeführt sind, wurden aufgrund der im Spiel genutzten Strategien, Prinzipien und Hilfsmittel abgeschätzt. Diese Abschätzung lässt eine hohe Lernwirksamkeit erwarten.

Hilfsmittel	d
Informative Skizze	1,24 ³
Tabelle	1,32 ²
(Lösungs-) Graph	1,24 ³
Gleichungen/ Formelsammlung	1,32 ²
Strategiesammlung	1,17/0,6
AKTIVIERUNG SITUATIONSGEBUNDENER DENKSSTRATEGIEN	
Planspiel, z.B. Klimaspiele, [16, 17] (Situation + Naturgesetz + Spieler -> Dilemma + Kooperation)	1,32 ²
Simulationsspiel, z.B. Formel 1-Spiel [18, 19] (Naturgesetz + Spieler -> Erkenntnis)	1,24 ³
Nacherfindungsspiel, z.B. Ringgenerator (Modultag) [20] (Ausgangsproblem + Naturgesetz + Erfinder -> Erfindung)	1,44 ⁴
Bionik-Spiel, z.B. Hörbare Elektrizität [21] (Biologische Lösung + Spieler -> Erleben d. Funktionsprinzips)	1,48 ¹
Spieltheorie-Spiel, z.B. Klima-Spiel, Nash-Gleichgewicht (Situation + Spieler -> Verhaltensgleichgewicht -> Erkenntnis) [17, 22, 23]	1,32 ²
Rollenspiel, z.B. Elektronen im Halbleiter (Naturgesetz [Elektron] + designte Umgebung [Festkörper] -> Systemverhalten)	1,44 ⁴
Konstruktionswettbewerb, z.B. Balkentheorie [24, 25] (techn. Problem + Naturgesetz + Spieler -> techn. Lösung)]	1,44 ⁴

¹Vernetzen mit Bekanntem; ²Erkennen von Bekanntem; ³Graph; ⁴Kreativitätsförderung via Zweck

Tab.4: Hilfsmittel [-> Öffner], Lernwirksamkeit in Effektstärke d [15]: **Situationsspezifisch (inkl. Lernspiele als Hilfsmittel zur Aktivierung von Denkstrategien)**

4.2. Evaluation

Die Auswertung der Evaluation erfolgt getrennt nach Lerngruppen, da lerngruppenspezifische Ergebnisse erwartet werden. Es werden die Ergebnisse des Vorher-Nachher-Vergleichs (Kompetenzraster), der allgemeinen Kursevaluation und der zukünftigen Nutzung sowie die Bewertungen der durchführenden Lehrkräfte vorgestellt.

4.2.1. Kompetenzraster (Vorher-Nachher)

Die positive Tendenz des Vorher-Nachher-Vergleichs (Abb. 2, Kompetenzraster) der selbsteingeschätzten Kompetenzen lässt erkennen, dass die SuS scheinbar Selbstkompetenzerlebnisse während des Modultages erfahren haben. Die Lernenden teilen mit, dass es ihnen leichter fällt einen Lösungsweg zu finden sowie komplexe und Transferaufgaben zu lösen. Dieses bedeutet, dass die höheren Effektstärken hier tendenziell abgebildet sind.

4.2.2. Allgemeine Kursevaluation

Anhand der allgemeinen Kursevaluation werden Informationen über die Transparenz, den Lernfortschritt, personale Kompetenzen und der SuS-Motivation erhalten, s. Abb. 3 und 4. Die Transparenz wird tendenziell positiv bewertet, jedoch erkennen nicht alle Lernenden den Zusammenhang zu

anderen Themen. Dies könnte daran liegen, dass nicht genügend (fächerübergreifende) Beispiele angeboten worden sind. Der Lernfortschritt ist bei den Technikern stärker ausgeprägt als bei den GPLern. Dieses könnte mit dem technisch-physikalischen Schwerpunkt der angebotenen Aufgabe zusammenhängen. Die personalen Kompetenzen wie Arbeiten in Gruppen, selbstständiges Lernen sowie eine faire Behandlung sind bei beiden Lerngruppen weitgehend positiv bewertet worden, wobei die Motivation zum Thema Lösungsstrategien bei den Technikern ausgeprägter ist. Dieses war zu erwarten, da die Notwendigkeit einer effizienten Problemlösefähigkeit bei den Technikern sehr viel höher ist.

	VORHER		NACHHER	
	Trifft nicht zu	Trifft zu	Trifft nicht zu	Trifft zu
Mir fällt es leicht Transferaufgaben zu lösen.				
Mir fällt es leicht neue Lösungswege zu finden.				
Ich weiß auch bei komplizierten Aufgaben wie ich anfangen soll.				
Auch bei schwierigen Aufgaben finde ich immer einen Weg, um die Aufgabe zu lösen.				
Wenn ich eine Aufgabe lösen möchte, denke ich über den besten Lösungsweg nach.				

Abb.2: Vorher-Nachher-Vergleich (Kompetenzraster)

4.2.3. Evaluation zur zukünftigen Nutzung

Die Evaluation zur zukünftigen Nutzung gibt Auskunft über die Einsicht der Notwendigkeit des Aneignens von Denkstrategien, siehe Abb. 5 und 6. Werden die Ergebnisse der Techniker näher beleuchtet, sind bei allen drei Aussagen positive Tendenzen zu verzeichnen, d.h. der Bedarf an einem eigenen Spektrum von Lösungsstrategien wird tendenziell erkannt. Bei den GPLern konnte nur bei wenigen Lernenden eine Einsicht erzeugt werden. Das hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass vorwiegend nicht die Fächer aus ihrem Schwerpunktbereich für den Modultag vorbereitet wurden.

4.2.4. Rückmeldung der durchführenden Lehrkräfte und der Beobachter

Mittels der Bewertungen der durchführenden Lehrkräfte und der Beobachter können positive Tendenzen aufgezeigt werden. Der Tenor ist, dass der Modultag eine gute Idee und sinnvoll für die SuS ist. Der generelle Einsatz von Lösungsstrategien im Unterricht ist passend und sie sollten auch zukünftig im Unterricht eingesetzt werden. Verbessert werden sollte die knappe Gruppenarbeitszeit. Es könnte auch über eine inhaltliche Reduktion zu Gunsten der Tiefe

in der Gruppenarbeitsphase und über eine Verlängerung der Übungsphase nachgedacht werden. Die Übersichtslisten (inkl. der Analogie) und die Strategiesammlung könnten noch effizienter bei einer großzügigeren Zeitplanung eingesetzt werden, z.B. indem öfter Bezug genommen wird.

4.2.5. Optimierungsmöglichkeiten

Wie bereits zuvor erwähnt, sollte der Modultag einen größeren Zeitrahmen bekommen. So könnten die Gruppenarbeitszeiten ausgedehnt werden, um die Übersichtslisten und die Strategiesammlung mehr in den Fokus zu rücken. Des Weiteren wäre es gewinnbringend den Reflexionsanteil zu erweitern, um das Denken auf der metakognitiven Ebene zu üben. Darüber hinaus könnte der Inhalt zu Gunsten der Tiefe reduziert werden. Die Evaluationsergebnisse zeigen, dass beim Modultag nicht alle SuS erreicht worden sind. Dieses liegt vermutlich an der thematischen Auslegung der GPLer, wahrscheinlich da die Problemlösefähigkeit in diesem Bereich hilfreich, jedoch nicht essentiell ist. Möglicherweise liegt bei den GPLern der Fokus mehr auf dem Aspekt der Harmonisierung. Es könnte mit mehr strukturgebenden Elementen, einer verbesserten Transparenz sowie einer optimierten Anschaulichkeit bei reduziertem Zeitstress eine Verbesserung erzielt werden. Ferner wäre zu überlegen, ob die Fächer für GPLer auf ihre Unterrichtsfächer (Mathematik, Biologie) begrenzt werden sollten. Bei der Umgestaltung des zeitlichen Rahmens wurde unter anderem von durchführenden Lehrkräften und den Beobachtern angeführt, dass der Einführungsvortrag und die Abschlussrunde zeitlich passend waren. Jedoch benötigen die Lernenden in der Gruppenarbeitsphase mehr Zeit zur Bearbeitung der einzelnen Themengebiete. Der Modultag 2016 war angesetzt bis 13 Uhr und könnte auf 15 oder 16 Uhr erweitert werden.

4.2.6 Beantwortung der Leitfrage

Ist das bewusste Erlernen von Lösungsstrategien in Physik sinnvoll? Die erste Leitfrage kann bejaht werden. Sehr hohe Effektstärken deuten auf eine gute Lernwirksamkeit hin, welche sich beim Vorher-Nachher-Vergleich widerspiegelt. Einsicht zum Nutzen der Lösungsstrategien konnte im Mittel bei den Technikern erzeugt werden. Das beim Großteil der Lernenden vorhandene Interesse an Lösungsstrategien ist der allgemeinen Kursevaluation zu entnehmen. Der fachliche Kompetenzzuwachs zeigt sich in der inhaltlichen Kursevaluation.

Eignet sich ein Modultag zur Einführung der Lösungsstrategien? Die Einführung der Lösungsstrategien an einem Modultag scheint sinnvoll, da diese Kompetenzen kumulativ und bewusst gefördert werden können, ohne dass andere Ziele verfolgt werden müssten, wie es im Schullalltag der Fall wäre. Die positiven Tendenzen der Evaluation zeigen die Möglichkeiten für die Lernenden auf. Laut Selbsteinschätzung der SuS konnte eine Steigerung ihrer Problemlösefähigkeit erzielt werden.

	Trifft im Wesentlichen zu	Trifft eher zu	Trifft teilweise zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	Ich kann es nicht entscheiden
	1	2	3	4	5	6
Techniker						
Transparenz						
Ich habe einen Überblick über das Thema bekommen.	15	31	38	15	0	0
Ich habe erkannt, wofür das Thema wichtig ist.	15	38	23	23	0	0
Ich habe erkannt, wie das Thema mit anderen Themen zusammenhängt.	15	31	31	23	0	0
Lernfortschritt						
Ich habe Wissen erworben.	31	15	38	8	8	0
Ich habe Fertigkeiten erworben.	8	38	38	8	8	0
Mir wurde die Erarbeitung des Themas einsichtig.	31	8	31	15	8	8
Ich kann das Thema selbstständig erklären.	15	15	31	31	8	0
Ich kann mir zu diesem Thema selbstständig weitere Kenntnisse erwerben.	17	17	42	25	0	0
Empathie						
Ich habe mit meinen Mitschülern gemeinsam gelernt.	23	31	23	15	8	0
Ich habe selbstständig gelernt.	23	15	23	31	8	0
Ich fühle mich fair behandelt.	15	23	38	15	0	8
Ich habe die Lehrerin/ den Lehrer als einfühlsam empfunden.	18	0	55	18	9	0
Motivationales						
Ich interessiere mich für das Thema.	8	23	38	15	15	0
Ich bin von dem Thema angetan.	8	23	38	8	23	0

Abb.3: Allgemeine Kursevaluation, Lerngruppe: Techniker, Angaben in %

	Trifft im Wesentlichen zu	Trifft eher zu	Trifft teilweise zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	Ich kann es nicht entscheiden
	1	2	3	4	5	6
GPIer						
Transparenz						
Ich habe einen Überblick über das Thema bekommen.	18	27	36	9	9	0
Ich habe erkannt, wofür das Thema wichtig ist.	9	45	27	9	9	0
Ich habe erkannt, wie das Thema mit anderen Themen zusammenhängt.	9	18	36	18	18	0
Lernfortschritt						
Ich habe Wissen erworben.	9	27	36	9	9	9
Ich habe Fertigkeiten erworben.	0	18	55	9	9	9
Mir wurde die Erarbeitung des Themas einsichtig.	0	18	27	36	18	0
Ich kann das Thema selbstständig erklären.	0	27	36	27	9	0
Ich kann mir zu diesem Thema selbstständig weitere Kenntnisse erwerben.	0	10	30	20	40	0
Empathie						
Ich habe mit meinen Mitschülern gemeinsam gelernt.	10	30	40	10	10	0
Ich habe selbstständig gelernt.	11	33	44	11	0	0
Ich fühle mich fair behandelt.	20	30	40	10	0	0
Motivationales						
Ich interessiere mich für das Thema.	0	10	30	20	30	10
Ich bin von dem Thema angetan.	0	10	20	20	40	10

Abb.4: Allgemeine Kursevaluation, Lerngruppe: GPIer, Angaben in %

	Techniker					
	Ich kann es nicht entscheiden	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft teilweise zu	Trifft eher zu	Trifft im Wesentlichen zu
Ich kann mir vorstellen die Lösungsstrategien auch in Zukunft anzuwenden.	0	0	0	39	50	11
Ich möchte noch mehr Lösungsstrategien kennen lernen.	0	5	21	47	16	11
Ich kann mir vorstellen die Lösungsstrategien auch außerhalb der Schule, z.B. Beruf, Studium, Arbeit anzuwenden.	5	10	5	50	25	10

Abb.5: Evaluation zu zukünftigen Nutzung, Techniker, Angaben in %

	GPIer					
	Ich kann es nicht entscheiden	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft teilweise zu	Trifft eher zu	Trifft im Wesentlichen zu
	0	7	7	71	14	0
	0	33	27	40	0	0
	8	8	23	46	15	0

Abb.6: Evaluation zu zukünftigen Nutzung, GPIer, Angaben in %

5. Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Untersuchung zur Sinnhaftigkeit des bewussten Lehrens von Lösungsstrategien im Physikunterricht sowie der Eignung eines Modultages zur Einführung. Es handelt sich bei der prozessbezogenen Kompetenz **Lösungsstrategien entwickeln und anwenden** um eine der wichtigsten im KC und für die spätere berufliche Handlungsfähigkeit. Die Neurowissenschaft stellt dar, dass jeder Mensch prinzipiell in der Lage ist diese zu erlernen, da die Anlagen für diese Fähigkeit angeboren sind.

Die Ergebnisse des Modultages zeigen eine systemische Übersicht inklusive der Hinweise auf Lernwirksamkeit nach Hattie. Hier wird deutlich, dass die Lernwirksamkeit von Lösungsstrategien ($d_{\max} = 1,48$) im Vergleich zum Problemlösen ($d = 0,61$) bis zu über 100 % erhöht sein kann. Es werden Beispiele zur Aktivierung der Denkstrategien mittels verschiedener Lernspiele aufgezeigt. Die Erprobung anhand eines Modultages soll Übersicht und Einsicht erzeugen und liegt laut der Evaluation und dem Vorher-Nachher-Vergleich weitgehend im positiven Bereich. Die Ergebnisse sind eindeutig lerngruppenspezifisch. Da bei den Technikern die Notwendigkeit der Anwendung von Denkstrategien größer ist, ist bei dieser Gruppe die Betroffenheit erhöht. Die GPlern konnten nicht in allen Bereichen erreicht werden. Das könnte verschiedenen Ursachen haben, z.B. dass die ausgewählten Kontexte nicht im Interessenfokus liegen, dass die Vorerfahrung der GPlern in Bezug auf Problemlösen nicht optimal war, oder dass die GPlern im Umgang mit Menschen weniger auf Problemlösung und mehr auf Harmonisierung setzen.

Die erste Leitfrage dieser Arbeit - **Ist das bewusste Erlernen von Lösungsstrategien in Physik sinnvoll?** – ist somit zu bejahen. Nicht-intuitive Problemlöser erhalten eine Möglichkeit sich diese Kompetenzen anzueignen. Intuitive Problemlöser verbessern ihre Fähigkeiten durch das bewusste Einsetzen und das Erweitern ihres Strategiespektrums. Ferner wird durch das Üben von Lösungsstrategien eine essentielle Schlüsselkompetenz für die spätere (technische) Berufs- und auch Alltagswelt gelegt.

Die zweite Leitfrage - **Eignet sich ein Modultag zur Einführung der Lösungsstrategien?** – ist zu bejahen. Den SuS fällt es nach diesem Tag im Mittel leichter einen Anfang zur Aufgabenbearbeitung zu finden. Sie finden leichter Lösungswege, auch bei komplexen Problemstellungen.

Für die zukünftige Arbeit an den Schulen kann festgehalten werden, dass die Einführung der Lösungsstrategien mittels eines Modultages sinnvoll ist, jedoch muss diese Kompetenz im folgenden Schulalltag weiter gefördert werden, da es sich bei der Aneignung dieser Fähigkeit um einen Prozess handelt. Des Weiteren ist der Einsatz von Lernspie-

len in der Praxis zu erproben, da diese zur Aktivierung von Denkstrategien geeignet scheinen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Chrost, G. (2009): Kerncurriculum für das Gymnasium- gymnasiale Oberstufe. Physik. Hannover: Niedersächsisches Kultusministerium
- [2] Gross, L. (2006): Evolution of Neonatal Imitation, PLoS Biol 4(9): e311. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040311>
- [3] Hütter, G. (2009): Die Ausbildung von Metakompetenzen und Ich-Funktionen während der Kindheit. In: Herrmann, U. (Hrsg.) Neurodidaktik. Weinheim: Beltz-Verlag.
- [4] Arnold, M. (2009): Brain-Based Learning and Teaching- Prinzipien und Elemente, In: Herrmann, U. (Hrsg.) Neurodidaktik. Weinheim: Beltz-Verlag.
- [5] Heuristik (2016): Entwicklung der Heuristik, <https://de.wikipedia.org/wiki/Heuristik> (letzter Zugriff: 01.05.2017)
- [6] Pólya, G. (1949), Schule des Denkens. Vom Lösen mathematischer Probleme. Tübingen und Basel, Francke
- [7] Bruder, R., Collet, C. (2011): Problemlösen lernen im Mathematikunterricht. Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG.
- [8] Bruder, R. (2017): Mathematikunterricht entwickeln. Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG.
- [9] SINUS (2017): Überblick: Von SINUS zu SINUS-Transfer, <http://www.sinus-transfer.de/programm/ueberblick.html> (letzter Zugriff: 02.05.2017).
- [10] Bruch, M. (2015): Problemlösendes Lernen im Physikunterricht. Norderstedt: Druck und Bildung: Books on Demand GmbH
- [11] Bruch, M. (2015): Lerntheorien im Kontext des Problemlösens: Eine praktische und umfangreiche Studie zu einem schülerorientierten Unterrichtsansatz, Hamburg: Diplomica Verlag GmbH
- [12] Kück, A. (2016): Entwicklung von Lösungsstrategien für anwendungsnahe physikalische Probleme. Stade: Studienseminar, Hausarbeit.
- [13] Beck, H. (2003): Neurodidaktik oder Wie lernen wir?. In: in „Erziehungswissenschaft und Beruf“, Heft 3/2003
- [14] Balzer, L. (2005): Wie werden Evaluationsprojekte erfolgreich? – Ein integrierender theoretischer Ansatz und eine empirische Studie zum Evaluationsprozess. Verlag Empirische Pädagogik, Landau.
- [15] Hattie, J. (2009): Visible learning. A synthesis of 800+ meta-analyses on achievement. London: Routledge
- [16] Rumpel, V. L. (2016): Entwicklung von globalem Denken mit Hilfe eines Planspiels zu Klima und Energiegewinnung im bilingualen Sachfach-

modul Physik – Ein Unterrichtsversuch in einer 8. Klasse am Gymnasium. Stade: Studienseminar, Hausarbeit.

[17] Carmesin, H.-O., Rumpel, V. L. (2017): Schülerinnen und Schüler entdecken und erkunden spielerisch den Klimawandel – Planspiel und mathematische Spieltheorie, Teile 1-3, MNU-Zeitschrift 2017

[18] Carmesin, H.-O. (2013): Experimente im Physikunterricht zur Kraft, Anhang: Formel 1 Rennen, Bremerhaven: MNU-Tagung, hans-otto.carmesin.org/images/Physikdid/Kraft2013MNU_BRHV.pdf (Stand: 30.5.17)

[19] Carmesin, H.-O. (2017): Schülerinnen und Schüler entdecken Gravitationswellen mithilfe von Computerexperimenten, Dresden: DPG Frühjahrstagung 2017

[20] Carmesin, H.-O. (2016): Wie macht die WEA aus mechanischer Energie elektrische Energie?. Bremerhaven: Modultag Lösungsstrategien, Max-Eyth-Schule Schiffdorf

[21] Tietje, L. (2016): Schülerversuch zur auditiven Wahrnehmung der elektrischen Leitfähigkeit – Ein Unterrichtsversuch in einer 5. Klasse am Gymnasium. Stade: Studienseminar, Hausarbeit.

[22] Carmesin, H.-O. (2004): Das Nash-Gleichgewicht, Dümmler Troisdorf: Bildungsverlag EINS, MNU 57/7 (15.20.2004)

[23] Carmesin, H.-O. (2012): Anni und Max erleben Nash-Gleichgewichte, Arbeitsblattspieltheorie (ab Klasse 7), MINT Zirkel, Juni/Juli 2012

[24] Carmesin, H.-O., Matthies, C. (2014): Schülerinnen und Schüler verstehen das 1-Liter Auto, Frankfurt: DPG Frühjahrstagung 2014

[25] Popov, V. (2014): Statik und elementare Festigkeitslehre (Mechanik I), Vorlesungsnotizen WiSe 2014/2015, Berlin: Technische Universität, FG Systemdynamik und Reibungsphysik