

Einsteins EJASE-Modell als Ausgangspunkt physikdidaktischer Forschungsfragen – Anregungen aus einem Modell zur Natur der Naturwissenschaft –

Eduard Krause*

* Universität Siegen, Herrengarten 3, 57072 Siegen, krause@physik.uni-siegen.de
(Eingegangen: 19.10.2016; Angenommen: 23.02.2017)

Kurzfassung

Die Physik ist zweifelsohne eine empirische Wissenschaft. Dennoch haben viele Begriffe der Physik keine direkte empirische Referenz und auch die mathematische Struktur der Physik spricht dafür, dass Physik ein menschengemachtes Theoriegebäude ist, das in vielen Aspekten von Konventionen lebt. Der Ambivalenz der Physik zwischen Theorie und Empirie muss auch die Physikdidaktik Rechnung tragen, wenn sie sich mit Fragen zu Begriffsbildungsprozessen im Physikunterricht, zur Rolle der Mathematik in der Physik oder zur erkenntnistheoretischen Bedeutung des Experiments beschäftigt.

Im vorliegenden Artikel wird das EJASE-Modell Einsteins vorgestellt, welches zum Ziel hat die Theoriebildungsprozesse im Spannungsfeld zwischen Theorie und Empirie zu beschreiben. Aus diesem Modell sollen mögliche Forschungsansätze für die Physikdidaktik abgeleitet und zur Diskussion gestellt werden.

Abstract

Physics is undoubtedly an empirical science. Nevertheless, many terms of physics have no empirical reference objects and also the mathematical structure of physics shows that physics is a human made theory. Physics education should consider the ambivalence of physics between theory and empiricism when it deals with questions about processes of formation concepts, the role of mathematics in physics and epistemological importance of the experiment.

In this article Einstein's EJASE model is presented, which aim is to describe the theory-building processes in the tension between theory and empiricism. It is possible to derive from this model new research approaches in physics education.

1. Einleitung

Physikdidaktische Forschung geht zunächst vom Fach Physik aus. Dabei ist in der Regel weniger die Tiefe einzelner konkreter Fragen der Physik von Relevanz – zumindest nicht in dem Maße wie es für rein fachliche Forschungen der Fall ist – sondern eher der übersichtsartige Blick auf die Physik. Dabei sollte die Didaktik auch die historische Genese des Faches, sowie deren wissenschaftstheoretische Reflexion im Bilde haben. Auf diesen und fachlichen Aspekten aufbauend muss die Physikdidaktik selbstverständlich auch bildungspolitische und lernpsychologische Blickwinkel berücksichtigen. Die Dichotomie aus Physik und Didaktik hat schon häufig für Diskussionen in der Physikdidaktik gesorgt. Gegenwärtig erheben sich Stimmen, die zu mehr Fachlichkeit in der Physikdidaktik ermuntern. In diesem Sinne haben Schecker und Starauschek den MNU-Standpunkt geäußert:

„Nach dem PISA-Schock schien der Physikdidaktik eines ihrer zentralen Elemente aus dem Blick gera-

ten zu sein: Das fachliche Lernen der Schüler/innen – und auch das der Studierenden. Ein Grund war die umfangreiche finanzielle Förderung dieser Bereiche durch das BMBF und andere Drittmittelgeber. Die Entwicklung und Evaluation fachlicher Darstellungen sowie Lernprozessanalysen verlor an Bedeutung. Um kein Missverständnis aufkommen zu lassen: Die Stärkung der lernpsychologischen und testtheoretischen Perspektive im breiten Selbstverständnis der forschungsorientierten Physikdidaktik und die damit verbundene Erschließung der qualitativen und quantitativen Methoden der empirischen Sozialforschung war nach einer langen stoffdidaktisch geprägten Phase ein notwendiger Schritt. Wir fragen uns allerdings, ob das Pendel in der Ausrichtung der Forschungsaktivitäten inzwischen zu weit in diese Richtung geschwungen ist.“ [32]

In diesem Sinne soll dieser Artikel – die Forschungsergebnisse mit lernpsychologischem Schwerpunkt anerkennend – zu Forschungsfragen anregen, die eher fachlich und wissenschaftstheoretisch orientiert sind. Dazu soll zunächst skizziert

werden, dass die Physik allgemein im Spannungsfeld zwischen Theorie und Empirie steht und in Abschnitt 3 soll dann Einsteins EJASE Modell als eine Möglichkeit vorgestellt werden, wie Theoriebildungsprozesse in diesem Spannungsfeld beschrieben werden können. Mit welchen didaktischen Hürden das Lernen von Physik in Bezug auf dieses Spannungsfeld verbunden ist, soll dann in Abschnitt 4 umrissen werden. Die Anwendung des EJASE Modells zur Beschreibung von Lernprozessen in der Physik und welche Forschungsanregungen sich daraus für die Physikdidaktik ergeben, ist Inhalt von Abschnitt 5. Diese Forschungshinweise können als Grundlage physikdidaktischer Forschung aufgefasst werden, im Rahmen eines solchen Artikels können diese aber nicht hinreichend konkret ausgeführt werden.

2. Die Physik im Spannungsfeld zwischen Theorie und Empirie

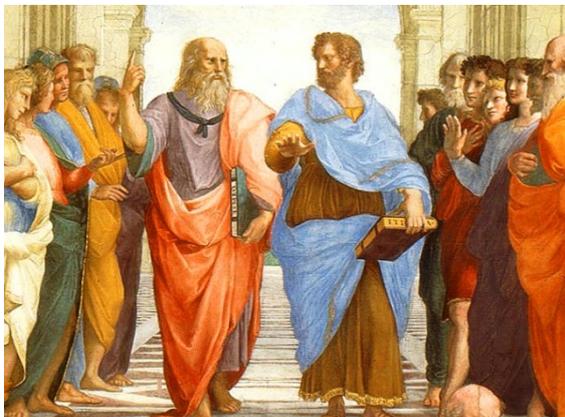


Abb. 1: Raffael hat in seinem Gemälde "Die Schule von Athen" den uralten Disput zwischen Rationalisten und Empiristen angedeutet, indem er Platon mit dem Finger gen Himmel weisen lässt und Aristoteles auf die Erde (Bildquelle: Raphael [Public domain], from Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File:La_scuola_di_Atene.jpg, aufgerufen am 04.05.2017).

Schon in der griechischen Antike war man sich uneins in der Frage, ob die Lehre der Natur empirisch oder rationalistisch geprägt sein soll (vgl. Abbildung 1).

Nach Platon sind nicht materielle Atome, sondern Zahlen und geometrische Verhältnisse Ausdruck der inneren Harmonie des Kosmos. Die Ur-Elemente sind nicht materielle Dinge, sondern reine Ideen, die hinter der sinnlichen Erfahrung stehen und nicht empirisch gewonnen werden können. Sein Schüler Aristoteles lehnte Platons Ideenwelt ab – für ihn gibt es nur eine (sinnlich erfassbare) Welt. Beobachtete Sinnesereignisse werden nach seinem Verständnis abstrahiert, indem individuelle Eigenschaften ausgeblendet werden, um Allgemeines zu beschreiben. Durch die Geschichte hindurch lassen sich namhafte Vertreter sowohl dem einen als auch dem anderen

Lager zuordnen [22]. Explizit wurde diese Debatte dann in der Neuzeit geführt, wo vor allem René Descartes als Vertreter des Rationalismus genannt wird und John Locke, Thomas Hobbes und David Hume für den Empirismus stehen. Nach Descartes sind empirische Daten immer hypothetisch, nur die daraus gewonnenen Deduktionen sind zuverlässig. Andererseits mahnt Locke, dass nicht Ideen, sondern empirische Daten die Basis von Naturwissenschaft sein sollten. In dieser Debatte wurde durch Galilei über die Etablierung der experimentellen Methode ein Meilenstein in der Entwicklung der Physik gesetzt [22, S.168ff]. Bis Galilei galt die aristotelische Sichtweise, dass das Buch der Natur in dieser Weise zu lesen sei: Die Vokabeln sind sinnlich wahrnehmbare Qualitäten wie Wärme, Farbe usw. Die Grammatik dieser Sprache ist durch die aristotelische Beziehungslogik vorgegeben. Galilei formulierte konträr dazu in seinem Werk „Der Goldwäger“:

„Die Philosophie steht in dem großen Buch - ich meine das Universum - das stets offen vor uns liegt, aber wir können es erst verstehen, wenn wir die Sprache und die Buchstaben verstehen, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben und seine Buchstaben sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Wort daraus zu verstehen.“ [7]

Durch die Implementierung der Mathematik in die Naturwissenschaft nimmt Galilei, im Gegensatz zur bis dahin geltenden Lehrmeinung des Aristoteles, die sich nur für qualitative Veränderungen interessiert hat, die quantitative Erfassung von Naturphänomenen in den Fokus. Mit der Mathematik hat auch die Deduktion in der Methodik der Physik einen anderen Stellenwert bekommen. Galilei sagt selbst, dass nicht empirisch-induktive Schlüsse maßgeblich für seinen Prozess der Erkenntnisgewinnung seien, sondern logische Schlüsse, indem er betont, dass er zwar ein Experiment gemacht hat, aber schon vorher habe ihn sein theoretisches Konzept fest davon überzeugt, dass die Erscheinung so verlaufen musste, wie sie tatsächlich verlaufen ist [22, S. 170]. Er experimentiert folglich nicht, um Erfahrungswissen zu sammeln, so wie Aristoteles vor und auch einige nach ihm (z. B. Francis Bacon), sondern, um deduktiv gewonnenes Wissen zu überprüfen. Wie revolutionär diese Verbindung von Theorie und Empirie in der Methodik der Physik war, bringt Kant in seinem Vorwort zur reinen Vernunft zum Ausdruck, wenn er schreibt:

„Als Galilei seine Kugeln die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen ließ, ...ging allen Naturforschern ein Licht auf. Sie begriffen, dass die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurfe hervorbringt, dass sie mit Prinzipien ihrer Urteile nach beständigen Gesetzen vorangehen und die Natur nötigen müsse, auf ihre Frage zu antworten, nicht aber sich von ihr allein gleichsam am Leitbände gängeln lassen zu

müssen; denn sonst hängen zufällige, nach keinem vorher gemachten Plane gemachte Beobachtungen gar nicht in einem notwendigen Gesetze zusammen, welches doch die Vernunft sucht und bedarf. Die Vernunft muss mit ihren Prinzipien nach denen allein übereinkommende Erscheinungen für Gesetze gelten können, in einer Hand, und mit dem Experiment, das sie nach jenen ausdachte, in der anderen, an die Natur gehen, zwar um von ihr belehrt zu werden, aber nicht in der Qualität eines Schülers, der sich alles vorsagen lässt, was der Lehrer will, sondern eines bestellten Richters, der die Zeugen nötigt, auf Fragen zu antworten, die er ihnen vorlegt. [...] Hierdurch ist die Naturwissenschaft allererst in den sicheren Gang einer Wissenschaft gebracht worden, da sie so viel Jahrhunderte durch nichts weiter als ein bloßes Heruntappen gewesen war.“ [14]

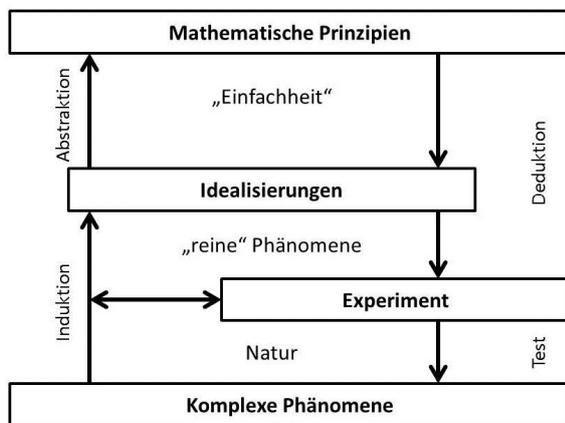


Abb. 2: Das methodische Konzept Galileis [vgl. 23]

Mit seiner Methode der Idealisierung, Mathematisierung und experimentellen Überprüfung wird Galilei als Begründer der Physik im eigentlichen Sinne geehrt ([22, S. 171f] oder auch [35]). Seine Methode ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Galilei hat mit der experimentellen Methode die Physik in ihrem erkenntnistheoretischen Selbstverständnis stark beeinflusst. Auch in der Zeit nach Galilei wurden zahlreiche Debatten um die Beschreibung der Metastruktur der Physik geführt. Es lassen sich auch in späterer Zeit zahlreiche Ansätze anführen, die den Schwerpunkt entweder mehr auf Seiten der Theorie oder auf Seiten der Empirie gelegt haben. Dennoch kann man sagen, dass die Physik dieser Ambivalenz wohl Herr geworden ist. Max Born hat die Schwierigkeit der Verortung der Physik im Spannungsfeld zwischen Theorie und Empirie wie folgt beschrieben:

„...aber Einstein hat völlig recht, dass Empirie allein ohne kühne Gedanken zu nichts führt. Der ist Meister, der das richtige Maß für beides findet.“ [5]

Einstein, der zweifellos zu den Meistern zählte, hat seine Arbeiten immer wieder selbst erkenntnistheoretisch reflektiert. Im nächsten Abschnitt soll seine

Auffassung zum Prozess der Theoriebildung in der Physik schematisch skizziert werden.

3. Das EJASE-Modell zur Beschreibung der Theoriebildung in der Physik

Das methodische Konzept Galileis, wie es im vorhergehenden Abschnitt skizziert und in Abbildung 2 dargestellt wurde, beinhaltet neben der induktiven Arbeitsweise auch die Deduktion. Diese ist notwendig, da die induktive Generalisierung von Naturphänomenen allein nicht zur naturwissenschaftlichen Erkenntnis führt. Es hat zwar immer wieder Versuche gegeben die Induktion als systematische Methode zur Theoriebildung in der Physik zu etablieren, doch solche Überlegungen führten meist nicht zum Erfolg. Das wohl bekannteste Unterfangen dieser Art ist die induktive Methode von Francis Bacon, der mittels systematischer Beobachtung und Notation (den bekannten baconschen Plus-Minus-Tabellen) in einem iterativen Prozess neue Erkenntnis (Ergebnis erster Stufe, zweiter Stufe usw.) zu gewinnen versuchte. Zwar hat er mit diesem Verfahren beispielsweise einen Zusammenhang zwischen Wärme und Bewegung entdeckt, aber dennoch kommentiert Simonyi in seinem Standardwerk zur Kulturgeschichte der Physik:

„In der Praxis ist das von Bacon ausführlich dargestellte Verfahren zum Auffinden wahrer Naturgesetze nicht verwendbar, und es wurde auch auf diese Weise kein neues Gesetz entdeckt.“ [33, S. 215]

Erfahrungsgemäß suggeriert der Physikunterricht aber leider allzu häufig, dass Naturgesetze durch Experimente induktiv gewonnen werden können. Untersuchungen zu Vorstellungen von Schülern und Schülerinnen von der „Natur der Naturwissenschaften“ haben vielfach belegt, dass die deduktive Komponente im Prozess der Erkenntnisgewinnung in der Physik unterrepräsentiert ist (siehe dazu z. B. [13] oder [37]). Weil diese falsche Vorstellung von der Natur der Physik so verbreitet ist, hat sich schon Einstein zeit seines Lebens in zahlreichen Schriften zur Philosophie der Naturwissenschaft gegen ein rein induktives Verständnis von Physik stark gemacht. Holton kommentiert Einstein diesbezüglich folgendermaßen:

„Das Erklimmen einer logischen Stufenleiter bei der mittels Induktion allgemeine Sätze aus einer vorhandenen Menge von Einzelbeobachtungen geschlossen werden, entspricht seiner Auffassung nach „einer Wissenschaft im jugendlichen Stande“ ([10], S. 379).

Einstein sagte selbst:

„Es gibt keine induktive Methode, die zu den Grundbegriffen der Physik führt. Daß dies nicht erkannt wurde, stellt den grundlegenden philosophischen Irrtum dar, dem so viele Forscher des 19. Jahrhunderts erlagen.“ [6, S. 84]

Empirische Wissenschaften beschreibt Einstein folgendermaßen:

„Die Wissenschaft ist der Versuch, die chaotische Mannigfaltigkeit der Sinneserfahrungen mit einem logisch einheitlichen Denksystem in Übereinstimmung zu bringen; in diesem System müssen die einzelnen Erfahrungen mit der theoretischen Struktur so in Beziehung gesetzt werden, das die sich ergebende Zuordnung einmalig und überzeugend ist. Die Sinneserfahrungen sind das gegebene Objekt. Aber die Theorie, welche sie interpretieren soll, ist Menschenwerk. Sie ist das Ergebnis eines äußerst mühsamen Anpassungsprozesses: hypothetisch, niemals ganz endgültig, immer Gegenstand von Fragen und Zweifel.“ [6, S. 105].

In einem Brief, den er 1952 an seinen Freund Maurice Solovine verfasst hat, skizziert er sehr komprimiert sein Verständnis der Natur der Naturwissenschaft, das in der Literatur als EJASE-Modell bekannt ist (reprinted und kommentiert bei [10] oder auch [23]). Kern seiner Erläuterung ist die Skizze in Abbildung 3.

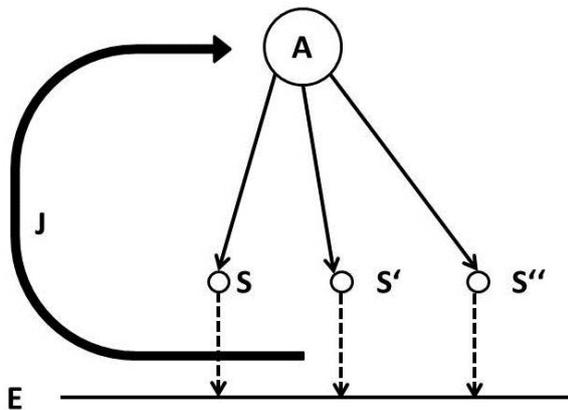


Abb. 3: Reproduktion von Einsteins Skizze zur Theoriebildung, die als EJASE-Modell bekannt geworden ist. E steht für (Sinnes-) Erfahrungen, J für Jump, A für Axiomen-System und S für gefolgerte Sätze [vgl.10].

Die Gerade E stellt die „Mannigfaltigkeit der Sinneserlebnisse“ dar, welche uns allen gegeben sind. Der eigentliche Ausgangspunkt des Prozesses sind aber nach Einstein die Axiome, die als freie geistige Schöpfung zu sehen und damit menschengemacht sind. Der geschwungene Pfeil hin zu den Axiomen, der als „Jump“ bezeichnet wird, wirft in diesem Modell sicherlich die meisten Fragen auf. Einstein kommentiert ihn wörtlich:

„Psychologisch beruhen die A auf E. Es gibt aber keinen logischen Weg von E nach A, sondern nur einen intuitiven (psychologischen) Zusammenhang, der immer auf Widerruf ist“ (Einstein an Solovine, zitiert nach [10, S. 378f])

Was genau alles in die Kreation von Axiomen einer Theorie einspielt, ist demnach schwer zu sagen – sicherlich empirische Erfahrungen, aber auch sonstige „kühne Ideen“, die auch aus metaphysischen Hintergrundüberzeugungen erwachsen sein können. Aus den gesetzten Axiomen können Sätze schluss-

gefolgert werden (S in Abbildung 3). Die Verbindungen von A und S sind reine Deduktionen, die an sich keinem empirischen Einfluss unterliegen. Die gefolgerten Sätze müssen sich in einer empirischen Theorie an der Empirie bewähren. Das macht Einstein durch die Pfeile von S auf die Gerade E deutlich. In der Physik geschieht dies meist über Experimente.

Die Axiome A, die gefolgerten Sätze S und deren Verbindung machen den mathematischen Kern der Theorie aus. Die Begriffe der Theorie haben an sich keine empirische Referenz, erst die gefolgerten Sätze sind empirisch zu überprüfen.

In diesem Modell kommt zu den bei Galilei thematisierten Schlussformen der Deduktion und Induktion noch ein weiteres hinzu – die Abduktion. Die Kreation der Axiome ist keine induktive Generalisierung von empirischen Sinneserfahrungen. Der Bogen von E zu A ist eher als Abduktion zu identifizieren. Dieses Schlussverfahren wurde vom Logiker Charles Sanders Peirce (1839–1914) etwa um die Wende vom 19. Jhd. zum 20. Jhd. in die Erkenntnistheorie eingeführt [28]. Ausgangspunkt einer Abduktion ist meist eine überraschende Tatsache, eine Frage oder eine Noch-Ungereimtheit, die eine Regel nahe legt, die die Frage beantwortet oder den Zweifel beseitigt. Diese Regel wird nicht aus den Vermutungen deduziert, sondern ad hoc gesetzt – daher auch die Bezeichnung Axiom. Aus diesen Axiomen werden dann in einem weiteren logischen Schluss Sätze deduziert. Zur Bewährung dieser Sätze werden induktiv gewonnene empirische Daten herangezogen. Somit spielen Abduktion, Deduktion und im gewissen Sinne auch die Induktion eine Rolle in diesem Prozess der Erkenntnisgewinnung. Natürlich wird dieser Prozess nicht nur einmal streng chronologisch durchlaufen. Die Theoriebildung wird durch ein wiederholtes Durchlaufen dieser Schritte verbessert. Im Rahmen dieser Arbeit kann leider nicht auf die erkenntnistheoretische Debatte eingegangen werden, wann und wie eine Theorie durch empirische Bewährung als verifiziert gilt, zu der Popper, Lakatos und andere interessante Beiträge geleistet haben.

4. Didaktische Hürden bei der Entwicklung einer adäquaten Physikauffassung beim Lernen von Physik

Dass die Physik im Spannungsfeld zwischen Theorie und Empirie steht (Abschnitt 2), kann verkürzt wie folgt beschrieben werden: Da die Physik die Wirklichkeit beschreiben will, gehört der empirische Aspekt per Definition zur Physik. Andererseits ist die Physik in ihrer Struktur eine (mathematische) Theorie und damit in vielen Stücken geistige Schöpfung und Konvention. Dabei hat sich die Physik im Verlauf ihrer Geschichte vom Phänomenologisch-Konkreten immer mehr zum Theoretisch-Abstrakten entwickelt. Diese Entwicklung kann vor allem an der Rolle der Mathematik in der Physik ausgemacht werden.

Da der individuelle Lernprozess im gewissen Sinne die generelle Fachgenese nachzeichnet, wirft dieser Umstand mit Blick auf das Lernen von Physik folgende Fragen auf: Wann, in welchem Maße und wie sollte die Mathematisierung der Physik im Schulcurriculum verständlich gemacht werden?

Für das Beantworten von Fragen dieser Art ist ein adäquates Verständnis von der Natur der Naturwissenschaften notwendig. Über die didaktische Aufbereitung der Metastruktur der Physik sind in den letzten Jahren zahlreiche Arbeiten erschienen. Im angelsächsischen Sprachraum sind diese in der Literatur vor allem unter dem Stichwort „Nature of Science“ [1] und im deutschen entsprechend unter „Natur der Naturwissenschaften“ [12] zu finden. Ein Diskussionspunkt ist dabei oft das besagte Zusammenspiel von Theorie und Empirie. Grob skizziert können folgende Übergänge und damit auch didaktische Hürden bei der Entwicklung einer modernen Physikauffassung bei Lernenden genannt werden:

Die ersten Berührungen mit der Physik machen Kinder auf rein phänomenologischer Ebene, indem sie über Dinge in der Natur ins Staunen kommen. Der Anfangsunterricht besteht aus der Beschreibung der Eigenschaften von Materie – ist also qualitativ. Einige entwicklungspsychologische Studien machen deutlich, dass der Lernprozess von Kindern im gewissen Sinne dem naturwissenschaftlichen Vorgehen entspricht. Der als „theory theory“ bekannt gewordene Ansatz, der vor allem mit den Namen Gopnik und Meltzoff in Verbindung gebracht wird, besagt, dass

„[...] sich Kinder die Welt in ganz ähnlicher Weise wie Naturwissenschaftler [aneignen]: Sie experimentieren gezielt, bewerten gewonnene statistische Muster und stellen anhand ihrer Beobachtungen Theorien auf“ ([8], Englisch im Original, Übersetzung durch den Autor).

Die Auffassung von Naturwissenschaft, die diesem Ansatz zugrunde liegt, ist eine sehr allgemeine, die nicht innerhalb der klassischen Fächergrenzen einzuordnen ist. So konnte beispielsweise der theory theory Ansatz auch schon fruchtbar in der Mathematikdidaktik angewendet werden, um die Entwicklung des Mengen- und Zahlenbegriffs bei Kindern zu erforschen [34].

Ein solches Verständnis von Naturwissenschaften beschreibt aber nur bedingt die Natur der Physik, wie sie als moderne Wissenschaft aufgefasst wird. Im Physikunterricht sollte sich bei den Lernenden im Laufe des Lernprozesses ein differenzierteres Verständnis zur Metastruktur der Physik bilden, das über die landläufige Auffassung von Naturwissenschaft als experimentell-induktives Generieren von Naturgesetzen hinausgeht.

Im weiteren Verlauf des Lernprozesses der Physik werden die Qualitäten von empirischen Objekten miteinander verglichen – es vollzieht sich ein Über-

gang zum komparativen oder auch halb-quantitativen Arbeiten.

Eine wesentliche didaktische Hürde des Physikunterrichts besteht dann in der Einführung des quantitativen Betreibens von Physik. Hier werden zum ersten Mal Formeln verwendet und Berechnungen durchgeführt. Die didaktischen Herausforderungen, die mit der Rolle der Mathematik in der Physik verbunden sind, werden beim Übergang zur quantitativen Physik, damit schon in der Sekundarstufe I, relevant. Damit sind nicht nur Aspekte gemeint, die den technischen Umgang mit Mathematik in den Blick nehmen, wie z. B. das Variablenverständnis, sondern Fragen nach der Bedeutung der Mathematik in der Physik müssen schon in den Anfängen des quantitativen Betreibens von Physik berücksichtigt werden. So soll u. a. vermittelt werden, dass die Mathematik nicht nur Werkzeug und nicht nur Sprache der Physik ist. Sie fungiert in der Physik als essentielles Glied im Prozess der Erkenntnisgewinnung.

Nach Auffassung des Autors können mit dem EJASE-Modell viele Aspekte dieser didaktischen Hürden hin zur quantitativen Physik abgebildet werden: Wie werden die Begriffe der Physik, die meist über Formeln definiert werden, in Anlehnung an die Empirie motiviert (das J im EJASE Modell)? Warum sind Deduktionen (logische Schlüsse, mathematische Herleitungen,...) in der Physik so effektiv (Die Verbindung von A nach S im EJASE Modell)? Wieso und wie muss sich eine mathematisch gewonnene Erkenntnis in der Physik empirisch bewähren (Die Verbindung von S nach E im EJASE Modell)?

Wie Fragen dieser Art in Forschungsansätze in der Physikdidaktik überführt werden können, soll im nächsten Abschnitt geklärt werden.

5. Das EJASE-Modell als Grundlage didaktischer Forschung

Das EJASE Modell wird als normative Grundlage für die Schulphysik sicherlich nicht allen bildungspolitischen und lerntheoretischen Ansprüchen gerecht, aber es ist als Modell – man bedenke dabei, dass ein Modell immer nur einige Aspekte abbildet – zur Vermittlung einer wissenschaftspropädeutischen Auffassung von Physik sicherlich geeignet. Das Potential des Modells soll anhand der folgenden drei Fragen aufgezeigt werden:

5.1. Wie kann der „Jump“ von den Sinneserlebnissen zu den Begriffen und Axiomen vollzogen werden?

Einstein sieht den Ausgangspunkt des von ihm beschriebenen Prozesses in den Sinneserlebnissen, aber der direkte Weg aus diesen die Begriffe und Axiome zu folgern, ist nach seinem Modell nicht zulässig. Der „Jump“ in Einsteins Modell lässt sich in zwei Teilschritte unterteilen: Das Filtern der Sin-

neswahrnehmungen und die Kreation von Begriffen und Axiomen.

5.1.1. Wie kann die Mannigfaltigkeit der Sinneserlebnisse gefiltert werden?

Das Beobachten macht einen Aspekt im Kompetenzbereich „Erkenntnisgewinnung“ im Fach Physik aus. Das physikalische Wahrnehmen eines Naturphänomens setzt sich aus der Beobachtung und der Beschreibung zusammen (vgl. [2]). Bei didaktischen Ausführungen zum Beobachten werden meist nur wahrnehmungspsychologische Aspekte [15, S. 236ff] berücksichtigt. Diese sind sicherlich sehr wichtig, dennoch sei in diesem Artikel auf erkenntnistheoretische Gesichtspunkte zum Beobachten hingewiesen. Dass es keine objektive Beobachtung gibt, sondern dass jeder Beobachter „theoriegeladen“ ist, ist wesentlich für den kritischen Rationalismus, der vor allem mit dem Namen Popper in Verbindung gebracht wird [30]. Einsteins Ansichten stehen im Einklang mit dieser philosophischen Denkrichtung, wenn er schreibt: „Ginge der Forscher ohne jedes Vorurteil an seine Arbeit heran, wie sollte er dann überhaupt aus der unendlichen Vielfalt komplexer Erfahrungen jene Tatsachen herausfinden, die einfach genug sind, um naturgesetzliche Verknüpfungen evident zu machen?“ [4]

Er beschreibt diese Vorurteile auch als Kategorien oder Schemen des Denkens, deren Wahl uns im Prinzip völlig frei steht, deren Berechtigung nur danach beurteilt werden kann, inwieweit ihr Gebrauch dazu beiträgt, die Gesamtheit der Bewusstseinsinhalte intelligibel zu machen [11, S. 135]. Solche a priori Denkschemata bezeichnet Holten als „Themata“. Ein Großteil seines Schaffens hatte die wissenschaftstheoretische und –historische Darstellung solcher Themata für die Physik zum Ziel [9]. Für den EJASE-Prozess bedeutet dies, dass mehrere Sprünge von E nach A möglich sind aber die „thematisch geformten Vorurteile“ (Θ_1 , Θ_2 und Θ_3) filtern diese (vgl. Abbildung 4).

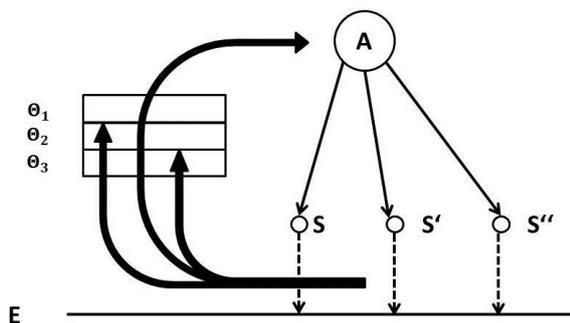


Abb. 5: Das um thematische Vorurteile modifizierte EJASE-Modell (vgl. [11] S. 136).

Beim Lernen von Physik sollten solche bewährten Denkprinzipien entwickelt werden. In der Dissertation „Das Erhaltungsprinzip in der Physik und seine Anwendung im Physikunterricht“ [20] wurde

exemplarisch am Erhaltungsprinzip die Bedeutung solcher Denkprinzipien für die Physikdidaktik aus fachlicher, fachhistorischer und wissenschaftstheoretischer Grundlage herausgearbeitet. Sie helfen Lernenden nicht nur das komplexe Theoriegeflecht der Physik zu systematisieren und zu strukturieren, sondern auch physikalisch zu denken. Damit ist das physikalische Wahrnehmen von Naturphänomenen aber auch das Lösen von Problemen der Physik gemeint. Physikalische Denkprinzipien machen einen wichtigen Aspekt im konzeptionellen Verständnis der Physik aus (Abbildung 5).

Mit solchen Prinzipien kann das umfassende Theo-

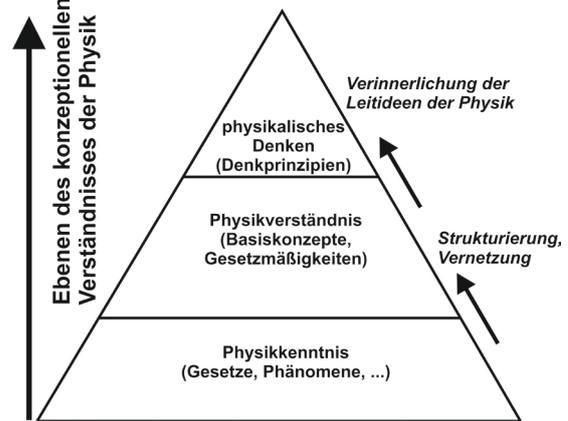


Abb. 4: Ein Modell zum konzeptionellen Verständnis der Physik [vgl. 20].

rieflecht der Physik systematisiert werden (der Übergang von der Physikkennntnis zum Physikverständnis in Abbildung 5). So können mehrere konkrete Gesetze der Physik auf ein allgemeines Prinzip zurückgeführt werden. In der Optik können z. B. das Brechungsgesetz wie auch das Reflexionsgesetz mit dem fermatschen Prinzip begründet werden. Dieses wiederum ist auch nur eine Ausführung des allgemeingültigeren Extremalprinzips, ebenso wie z. B. das Prinzip von Maupertuis. Solche Prinzipien helfen nicht nur das Theoriegebäude der Physik zu sortieren, sondern sind wichtiger Bestandteil physikalischen Problemlösens oder allgemeiner physikalischen Denkens. Durch die Verinnerlichung dieser Prinzipien wandeln sie sich zu Denkmaximen, oder anders formuliert: Denkprinzipien (Übergang zum physikalischen Denken in Abbildung 5). Aus der Geschichte der Physik lassen sich zahlreiche Beispiele anführen wie das Anwenden solcher Denkprinzipien (Erhaltungsprinzip, Symmetrieprinzip, Extremalprinzip,... - als a priori Denkmaxime) der zündende Funke im Prozess der Theoriebildung war [22]. Diese Denkprinzipien sollten in der Didaktik der Physik von hoher Bedeutung sein [20].

Das Vermitteln solcher Denkprinzipien stellt eine Herausforderung für den Physikunterricht dar. Vor allem wenn man bedenkt, dass Schülerinnen und Schüler mit einem eigenen Vorverständnis zu physikalischen Begriffen und Theorien in den Unterricht kommen, und dass diese lerntheoretisch nur mühsam

revidiert werden können. In der genannten Dissertation [20] werden folgende zwei Interventionsmöglichkeiten zur Vermittlung solcher Denkprinzipien angeregt: Zum einen kann dies durch die Betonung der Physikgeschichte gelingen. Damit ist nicht das gelegentliche Erwähnen interessanter historischer Anekdoten gemeint, sondern der Hinweis auf den Entstehungsprozess einer Theorie mit der Betonung der Wirksamkeit solcher Denkprinzipien. Zum andern sollten solche Denkprinzipien beim Bearbeiten von offenen Aufgaben seitens der Lehrperson explizit offengelegt werden. Damit ist eine offene Aufgabenkultur ein notwendiges Kriterium zum Erlernen von Denkprinzipien und das hochfrequentierte Betonen der Effektivität von Denkprinzipien ein hinreichendes.

In einer Schulbuchanalyse zur didaktischen Nutzung der grundlegenden Prinzipien der Physik konnte gezeigt werden, dass die Betonung solcher Denkschemata im Unterricht noch ausbaufähig ist [20]. Mit dieser Studie sind bei Weitem noch nicht alle Fragen um das didaktische Potential solcher thematisch geformter Vorurteile geklärt, sodass sich hier ein noch ziemlich unbearbeitetes Feld physikdidaktischer Forschung auftut. Interessant wäre vor allem die Konzeption und Erprobung von unterrichtsnahen Lehr-Lern-Settings oder auch Aufgaben, die zur Entwicklung solcher Denkprinzipien beitragen (wie z. B. [18] oder auch [19]).

5.1.2. Wie sollten Begriffe beim Lernen von Physik eingeführt werden?

Nach Einstein sind die Begriffe der Physik freie geistige Schöpfungen, die zwar durch empirische Sinneseindrücke inspiriert sind, aber nicht induktiv aus ihnen gefolgert werden können. Der typische Physikunterricht suggeriert jedoch häufig, dass sich die physikalischen Begriffe fast selbstverständlich durch Klassifikation und Beschreibung der Wirklichkeit aufdrängen. Die physikdidaktische Literatur unterstützt beim Thema Begriffsbildung im Lehr-Lernprozess dieses Vorgehen (z. B. [16]), das aus pragmatischen Gründen sicherlich nützlich, erkenntnistheoretisch jedoch bedenklich ist. Das Staunen und Rätseln über empirische Phänomene sollte den kreativen Prozess des Begriffs- und Hypothesenbildens auslösen. Gerade durch das EJASE-Modell wird klar, dass das entdeckende Lernen nach Bruner [3] in der Physik nur bedingt möglich ist: Schülerinnen und Schüler können nicht gänzlich selbstentdeckend auf die Begriffsdefinitionen und Axiome kommen, die sich in der Genesis der Physik in langwierigem mühevolem Ringen ergeben haben. Aber die *Notwendigkeit* zur Einführung solcher Begriffe und Grundregeln (Axiome) bei der Beschreibung von Naturphänomenen kann und muss bei Lernenden durch eigene Aktivität entdeckt werden. Genau das meint der abduktive Schluss. Ein möglicher abduktiver Schluss im Physikunterricht soll mit einem Beispiel verdeutlicht werden, das wieder aus der Optik gewählt wird. Schülerinnen und Schüler

befassen sich mit dem erstaunlichen Phänomen der Lichtbrechung z. B. motiviert durch die Fischfänger-Geschichte, der mit seinem Speer nie die Fische trifft, wenn er entlang der geradlinigen Verbindung seiner Augen und der Fische wirft. Dabei werden sie wohl kaum selbstentdeckend auf das Brechungsgesetz kommen, aber Sie werden schließen können, dass es eine Regelmäßigkeit gibt, mit der dieses Phänomen erklärt werden kann. Auf diesem Schluss aufbauend kann das Brechungsgesetz motiviert werden (ein möglicher Weg wird im nächsten Abschnitt skizziert).

In der Mathematikdidaktik wird die Abduktion bereits diskutiert ([27] oder auch [36]). So wurde beispielsweise die didaktische Theorie des Begrifflernens in Anlehnung an die Abduktion beschrieben und empirisch befohrt [26].

Die Aufarbeitung der Abduktion für Begriffsbildungsprozesse in der Physik würde aus Sicht des Autors für die Physikdidaktik ebenfalls ein lohnenswertes Unterfangen darstellen.

5.2. Welche Rolle spielt die Deduktion im Lernprozess der Physik?

Wie schon erwähnt, haben empirische Studien zu den Vorstellungen von Schülern und Schülerinnen von der „Natur der Naturwissenschaften“ vielfach ergeben, dass die deduktive Komponente im Prozess der Erkenntnisgewinnung in der Physik unterrepräsentiert ist (siehe dazu z. B. [13] oder [37]). Für die Physikdidaktik wäre es sehr interessant die Übergangsproblematik von Schule zu Hochschule vor diesem Hintergrund zu befohren, da schon in den Experimentalphysikvorlesungen in den ersten Semestern das mathematisch-deduktive Arbeiten eine wesentlichere Rolle spielt als in der Schule [17]. Allzu oft werden die Schwierigkeiten von Studierenden der ersten Semester im Physikstudium nur an den Inhalten ausgemacht. Zweifelsfrei machen mangelnde Kenntnisse und Kompetenzen in Physik und Mathematik auch einen großen Teil des Problems aus, die Roller der Andersartigkeit von Schul- und Hochschulphysik wird bei der Übergangsproblematik oft nicht berücksichtigt. Forschungen zu den wesensmäßigen Unterschieden zu den Auffassungen von Physik in Schule und Hochschule wären bei diesem Thema interessant. Konkret wären deskriptive Studien zur Rolle der Deduktion in der Schule (oder konkreter in Schulbüchern) und zu den Physikauffassungen von Lehrerinnen und Lehrern sowie Schülerinnen in Schülern vor diesem Hintergrund lohnenswert. Vor allem der Vergleich zur Hochschule d. h. zu den Hochschullehrbüchern der Physik und den Physikauffassungen der Dozenten wäre relevant.

Da in der Physik das deduktive Schließen meist mit mathematischem Arbeiten gleichgesetzt werden kann, gilt es auch für die Didaktik grundsätzlich zu klären, warum die Physik so mathematisch ist und wann die Mathematik in welcher Weise im Lernprozess in die Physik implementiert werden sollte. Zu

diesem Thema sei auf das Heft „Mathematik im Physikunterricht“ [31] und auf die Dissertationen von Olaf Uhden [37] und Olaf Krey [21] verwiesen. Der Grundtenor dieser Arbeiten ist, dass Mathematik in der Physik mehr als ein Werkzeug ist. Im Prozess der Erkenntnisgewinnung stellt die mathematische Deduktion ein wesentliches Glied dar. Im EJASE – Modell Einsteins macht das die Verbindung von A nach S aus. Im Beispiel des Brechungsgesetzes aus Abschnitt 5.1.2 könnte die Rolle der Deduktion in der Physik wie folgt verdeutlicht werden: Vom allgemeinen Prinzip (im EJASE-Modell würde man Axiom sagen) der zeitminimalen Lichtausbreitung (fermatsche Prinzip) kann mit einigen mathematischen Schritten das konkrete Brechungsgesetz gefolgert werden. Für die Ausbreitung eines Lichtstrahls von A nach B, wobei A und B in unterschiedlichen Medien liegen, kann das fermatsche Prinzip wie folgt ausgedrückt werden:

$$\delta t = \delta \int_A^B \frac{dl}{c} = 0 \quad \{1\}$$

Entsprechend Abbildung 6 ergibt sich die Zeit zu:

$$t = \frac{s_1}{c_1} + \frac{s_2}{c_2} \quad \{2\}$$

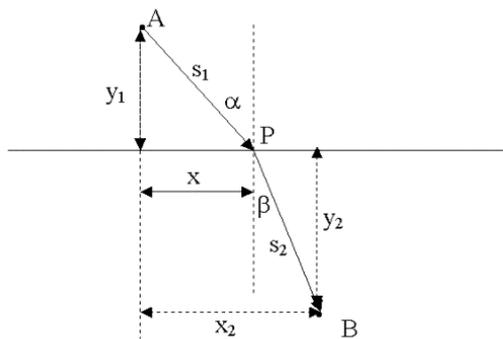


Abb. 6: Skizze zur Herleitung des Brechungsgesetzes.

$$\Leftrightarrow t = \frac{1}{c_1} \sqrt{x^2 + y_1^2} + \frac{1}{c_2} \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}$$

Damit kann das snelliussche Brechungsgesetz wie folgt hergeleitet werden:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{c_1 \sqrt{x^2 + y_1^2}} - \frac{x_2 - x}{c_2 \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} \quad \{3\}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dt}{dx} = \frac{x}{c_1 s_1} - \frac{x_2 - x}{c_2 s_2} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \{4\}$$

Damit ist ausgehend von einem allgemeinen Prinzip durch einige mathematische Schritte eine neue physikalische Erkenntnis zutage gefördert worden. Entsprechend dem EJASE-Modell muss sich diese noch empirisch bewähren. Für den Schulunterricht müsste erwägt werden, ob Schülerinnen und Schüler über das notwendige mathematische Wissen verfü-

gen um die Herleitung in dieser Form nachvollziehen zu können, aber unabhängig davon sieht der Autor es als grundsätzlich sinnvoll an, konkrete Gesetze von allgemeinen Prinzipien ausgehend zu deduzieren. Wenn dieses Potential der mathematischen Deduktion zur Generierung von Hypothesen nicht mehr im Unterricht vermittelt wird, so beraubt man sich eines essentiellen Gliedes im Prozess der Erkenntnisgewinnung. Allerdings ist es eine berechnete didaktische Frage, ab welcher Altersstufe das abstrakt-deduzierende Vorgehen in der geschilderten Weise vermittelt werden kann. Dabei machen entwicklungspsychologische Aspekte des Lernens einerseits und bildungspolitische Aspekte der Wissenschaftspropädeutik andererseits den Rahmen aus. Fragen dieser Art können und sollten die physikdidaktische Forschung beschäftigen.

5.3. Was kann die empirische Bewährung eines physikalischen Satzes leisten?

Wilfried Kuhn hat als Physikdidaktiker mit starkem Interesse an Wissenschaftstheorie und -historie schon in den 80ern und 90ern immer wieder Fragen nach der Rolle des Experiments für die Physikdidaktik gestellt [23]. Auch andere Didaktiker haben in diese Richtung gearbeitet (siehe z. B. [35]). Eindrücke aus dem Physikunterricht zeigen aber immer wieder folgendes naive Bild der Theoriebildung der Physik: Es wird zu Beginn der Stunde ein Experiment durchgeführt und aus einer Hand voll Messdaten wird ein allgemeingültiges Gesetz der Physik generalisiert. Das EJASE-Modell Einsteins zeigt, dass diese Physikauffassung das Wesen des Erkenntnisgewinnungsprozesses nicht korrekt abbildet. Guter Physikunterricht sollte eine fachlich-authentische Auffassung von Physik vermitteln. Demnach wäre es aus didaktischer Sicht sinnvoller, das Experiment den theoretischen Erwägungen anzuschließen, da nach der experimentellen Methode der Physik das Experiment keine Hypothesen generiert, sondern zu deren Überprüfung dient. Um im Beispiel des Brechungsgesetzes zu bleiben, müsste nach dem abduktiven Erkennen der Notwendigkeit eines Gesetzes zur Beschreibung des verblüffenden Naturphänomens der Brechung und der anschließenden deduktiven Herleitung des Gesetzes eine experimentelle Überprüfung stattfinden. Dazu könnten klassische Experimente an der optischen Scheibe durchgeführt werden, aus denen Messungen zur Überprüfung gewonnen werden. Die logische Schlussform die diesen Schritt am ehesten beschreibt ist die Induktion, weil konkrete Messdaten mit dem allgemeinen Gesetz abgeglichen werden.

Festzuhalten bleibt aber auch hier, dass Lernende für diese äußerst anspruchsvolle Vorgehensweise der erkenntnistheoretischen Einbettung des Experiments intellektuelle Fähigkeiten benötigen, die sich erst über eine lange Zeit nach und nach entwickeln können.

Neben diesen entwicklungspsychologischen Aspekten wirft dieses Vorgehen eine Frage auf, die bis heute die Erkenntnistheorie beschäftigt, nämlich was man eigentlich unter einer experimentellen Überprüfung zu verstehen habe. Wie schon angedeutet, ist in der Physik eine Verifikation durch ein Experiment nicht möglich (vgl. [23]). Bestenfalls eine experimentelle Falsifikation, wobei auch umstritten ist, ob eine ganze Theorie durch einen empirischen Befund verworfen werden kann (vgl. [24]). Was die empirische Bewährung leisten kann und leisten muss, ist die Sinnhaftigkeit der Axiome und der Begriffe und damit auch der gefolgerten Sätze zu belegen. Wenn sich die gesetzten Axiome und die definierten Begriffe empirisch als nicht sinnvoll erweisen, sind Revisionen notwendig. Horst Melcher kommentiert Einstein diesbezüglich wie folgt:

„Einsteins leitende Idee war: Was man denken kann (Begriffsbildung), aber keiner experimentellen Prüfung zugänglich ist [...] hat keinen physikalischen Sinn, findet also kein Gegenstück oder Äquivalent in der Realität.“ [25, S. 37]

Das Experimentieren ist im Physikunterricht in vielerlei Hinsicht beforscht worden, vor dem Hintergrund des EJASE-Modells Einsteins, könnten aber ganz neue Forschungsfragen für die Physikdidaktik aufzun.

6. Zusammenfassung

Das EJASE-Modell Einsteins ist eine Möglichkeit, den Erkenntnisprozess in der Physik im Spannungsfeld zwischen Theorie und Empirie zu beschreiben. Aus Sicht des Autors eignet es sich vor allem deshalb besonders gut, weil es kompatibel mit der Abfolge logischer Schlussformen ist, wie sie in der allgemeinen Erkenntnistheorie diskutiert werden. So sieht Peirce im Prozess der Erkenntnisgewinnung zunächst die Abduktion, dann die Deduktion und anschließend die Induktion am Werk [29, S. 171]. Der Ansatz dieses Zusammenspiels der Schlussformen wurde in anderen Didaktiken (z. B. der Mathematikdidaktik) schon auf die Beschreibung von Lernprozessen angewendet. Im vorliegenden Artikel wurde gezeigt, wie die Anwendung des EJASE-Modells – und damit auch in gewisser Weise die Abfolge der Schlussformen nach Peirce – zu physikdidaktischer Forschung anregen können. Auf diesen Anregungen aufbauend könnten konkrete Forschungsprojekte in den Blick genommen werden.

7. Literatur

- [1] Bell, R., Abd-El-Khalick, F., Lederman, N. G., McComas, W. F. & Matthews, M. R. (2001): The Nature of Science and Science Education: A Bibliography. *Science & Education* (10), p. 187-204.
- [2] Beschlüsse der Kultusministerkonferenz (16.12.2004): Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss.
- [3] Bruner, J. S. (1961): The act of discovery. *Harvard Educational Review*, 31, 21-32.
- [4] Einstein, A. (1919): Induktion und Deduktion in der Physik“, *Berliner Tageblatt*, 25. Dezember 1919.
- [5] Einstein, A. und Born, M. (1969): Briefwechsel 1916-1955. München.
- [6] Einstein, A. (1952): Aus meinen späten Jahren. Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt.
- [7] Galilei, G. (1623): *Saggiatore*; z.n. Blumengerg, H.: Galileo Galilei. *Siderius Nuncius*. Nachricht von den Sternen. Frankfurt: Suhrkamp 1980.
- [8] Gopnik, A., Meltzoff, A. N., Kuhl, P. K. (2001): The scientist in the crib. What early learning tells us about the mind. New York: Harper.
- [9] Holton, G. (1984): *Themata – Zur Ideengeschichte der Physik*. Braunschweig/ Wiesbaden: Vieweg-Verlag.
- [10] Holton, G. (1981): *Thematische Analyse der Wissenschaften – Die Physik Einsteins und seiner Zeit*. Frankfurt am Main: suhrkamp Verlag.
- [11] Holton, G. (1979): Einsteins Methode zur Theoriebildung. In: Aichelburg, P.C.; Sextl, R. U. (Hrsg.): *Albert Einstein – Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik*, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, S. 111-140.
- [12] Höttecke, D. (2001a): *Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen*. Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen. Berlin: Logos-Verlag, Diss.
- [13] Höttecke, D. (2001b): *Die Vorstellungen von Schülern und Schülerinnen von der „Natur der Naturwissenschaften“*. In *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 7, S. 7–23.
- [14] Kant, I. (1787): *Kritik der reinen Vernunft*. Erster Band. Berlin: Deutsche Bibliothek Verlagsgesellschaft. S.16.
- [15] Kircher, E; Girwitz, R.; Häußler, P. (Hrsg.): *Physikdidaktik – Theorie und Praxis*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [16] Klinger, W. (1989): *Bildung physikalischer Begriffe und ihre Vermittlung im Unterricht*. Beitrag aus der Reihe: Schneider, W. B. (Hrsg.): *Wege in der Physikdidaktik*, Band 1, Sammlung aktueller Beiträge aus der physikdidaktischen Forschung. Erlangen: Palm & Enke.
- [17] Krause, E. (2016): *Die Übergangsproblematik von der Schule zur Hochschule im Fach Physik aus lerntheoretischer Sicht*. In: *PhyDidB – Didaktik der Physik*.
- [18] Krause, E.; Deitersen, C. (2015): *Die Frage nach dem Maximum der Weltbevölkerung als offene Aufgabe im Physikunterricht*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik*, Heft 2/64, (Jg. 64).
- [19] Krause, E. (2013): *Helmholtz über die Leuchtkraft der Sonne*. In: *Astronomie und Raumfahrt im Unterricht*, Heft 135/136 (Jg.50).

- [20] Krause, E. (2013): Das Erhaltungsprinzip in der Physik und seine Anwendung im Physikunterricht. Dissertation an der Universität Siegen.
- [21] Krey, O. (2012): Zur Rolle der Mathematik in der Physik. Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender. Dissertation an der Universität Potsdam.
- [22] Kuhn, W. (2016): Ideengeschichte der Physik – Eine Analyse der Entwicklung der Physik im historischen Kontext. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.
- [23] Kuhn, W. (1983): Das Wechselspiel von Theorie und Experiment im physikalischen Erkenntnisprozess. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 12, S. 355-362.
- [24] Lakatos, I. (1974): Geschichte der Wissenschaft und ihre rationalen Rekonstruktionen. In: Diederich, W. (Hrsg.): Beiträge zur diachronischen Wissenschaftstheorie. Frankfurt M., S. 93f.
- [25] Melcher, H. (1979): Albert Einstein wider Vorurteile und Denkgewohnheiten. Braunschweig: Vieweg.
- [26] Meyer, M. (2012): Vom Satz zum Begriff. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.
- [27] Meyer, M.; Voigt, J. (2008): Entdecken mit latenter Beweisidee – Analyse von Schulbuchseiten. In: Journal für Mathematik-Didaktik, Volume 29, Issue 2, pp 124-151.
- [28] Peirce, Ch. S., CP (1985): Collected Papers of Charles Sanders Peirce (Band I-VI 1931-1935. Hrsg. von Ch. Hartshorne & P. Weiß; Band VII-VIII 1985 hg. von A. W. Burks), Cambridge: Harvard University Press.
- [29] Peirce, C. S., Hartshorne, C., & Weiss, P. (1960a). Pragmatism and pragmatism and Scientific metaphysics ([2. print]). Collected papers of Charles Sanders Peirce: / ed. by Charles Hartshorne and Paul Weiss Vol. 5 and 6. Cambridge, Mass.: Belknap Press of Harvard Univ. Press.
- [30] Popper, K. (1974): Objektive Erkenntnis – Ein evolutionärer Entwurf. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- [31] Pospiech, G.; Karam, R. (2016): Mathematik im Physikunterricht. Themenheft in: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik. 153/154 (27).
- [32] Schecker, H. & Starauschek, E. (2016): Fachlichkeit der Fachdidaktik. MNU-Standpunkt. In: MNU journal. Jahrgang 69, 05.
- [33] Schimony, K. (1990): Kulturgeschichte der Physik. Thun, Frankfurt a. M.: Verlag Harri Deutsch.
- [34] Schlicht, S. (2016): Zur Entwicklung des Mengen- und Zahlbegriffs - Rekonstruktion der Entwicklung mittels empirischer Theorien. Erscheint in: Beiträge zum Mathematikunterricht 2016, WTM-Verlag, Münster.
- [35] Schwarz, O. (2009): Die Theorie des Experiments – Aus der Sicht der Physik, der Physikgeschichte und der Physikdidaktik. In: Geographie und Schule, Heft 180/2009, S. 15-20.
- [36] Söhling, A. C. (2015): Problemlösen – Mittels Irrtümern zu strukturellen Erkenntnissen. Beiträge zum Mathematikunterricht 2015 Digital.
- [37] Uhden, O. (2012): Mathematisches Denken im Physikunterricht – Theorieentwicklung und Problemanalyse. Dissertation an der Technischen Universität Dresden.