

## Der Erhaltungsgedanke in der Physik –Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkwerkzeug

- Werden wir diesem Anspruch gerecht? -

**Eduard Krause**

Universität Siegen, krause@physik.uni-siegen.de  
(Eingegangen: TT.MM.2006; Angenommen: TT.MM.2006)

### **Kurzfassung**

Wie ein wissenschaftstheoretischer, -historischer und fachlicher Blick auf die Physik zeigt, kann der Erhaltungsgedanke im Hinblick auf verschiedene Aspekte aufgefasst werden. Er tritt uns in Gestalt eines Naturgesetzes, einer Gesetzmäßigkeit, Denkwerkzeugs und eines Grundprinzips entgegen. Wie repräsentiert der Physikunterricht diese Aspekte? Die Antwort auf diese Frage, der mittels einer Schulbuchanalyse nachgegangen wird, erweist sich zum Erlangen der im Fach Physik geforderten Kompetenzen als bedeutsam.

### **1. Allgemeines zum Problemlösen in der Physik**

Das Vermitteln der Problemlösekompetenz ist erklärtes Ziel des Physikunterrichts. So fordern es beispielsweise die einheitlichen Prüfungsanforderungen für die Gymnasiale Oberstufe [1], in denen es heißt, dass „Prüflinge Erfahrungen mit Strategien der Erkenntnisgewinnung und Problemlösung aufweisen sollten“. Die jüngsten physikdidaktischen Publikationen weisen diesbezüglich vor allem auf die Schwachstellen in der Aufgabenkultur im gängigen Physikunterricht hin, die es zu beheben gilt, wenn man bei seinen Schülerinnen und Schülern nachhaltige Problemlösekompetenz anstrebt. Die bekannte Mahnung lautet, dass man weg von den klassischen Einsetzaufgaben hin zu offeneren Fragestellungen gehen sollte. Allgemeiner Beliebtheit erfreuen sich in diesem Zusammenhang die sogenannten Fermi-Aufgaben. Dabei werden authentische Probleme mit zu wenigen Informationen für eine exakte Lösung angegangen. Die exakte Lösung ist auch gar nicht das Ziel, sondern Lernende sollen herausfinden, wie man mit wenigen Information zu kreativen Abschätzungen kommen kann. In diesem Zusammenhang ist folgendes Problem allerdings nicht abzustreiten: Könnte es nicht sein, dass zum selbstständigen Lösen solcher Aufgaben bereits kognitive Fähigkeiten auf einem relativ hohen Entwicklungsniveau vorausgesetzt werden müssen? Uns als Lehrende der Physik sollte beim Stellen solcher Aufgaben daher vor allem die Frage beschäftigen, ob und wie wir im Unterricht den Lernenden einen ausreichenden „Werkzeugkasten“ an die Hand geben, um solche Aufgaben anzugehen. Meist wird, bewusst oder unbewusst, von den Lehrenden lediglich auf Allgemeinwissen und gesunden Menschenverstand gesetzt und nicht, oder nur vage, auf die typischen Denkweisen und Methoden der Physik (vgl.[2]). Sollten wir im Physikunterricht aber nicht

auch physikalische Problemlöswerkzeuge und Denkschemata schulen und fördern? Welche physikalischen Denkprinzipien erfüllen diesen Zweck eines Problemlöswerkzeuges? Das absolut Notwendigste, was sich physikalisch zum Problemlöseprozess sagen lässt, ist, dass jeder Ansatz der gewählt wird, jede Hypothese, die formuliert wird, mit den Gesetzen der Physik kompatibel sein muss. Lernende lassen oft diesen weiten Blick auf die allgemeingültigen Gesetze der Physik vermissen und gehen in ihren Ansätzen nur vom unmittelbaren Kontext des Unterrichtes aus. Praktisch gesehen ist es freilich auch unmöglich jede Hypothese mit allen Gesetzen der Physik auf Verträglichkeit hin zu vergleichen. Das ist auch nicht nötig, da sich die große Anzahl an physikalischen Gesetzen auf eine überschaubare Anzahl an Grundregeln reduzieren lässt. Es gilt folglich den Schülerinnen und Schülern ein Gefühl für diese Grundregeln der Physik zu wecken. Das ist notwendig, aber noch nicht hinreichend für den Problemlöseprozess.

Man kann eine Problemlösung mit dem Fahren von A nach B in einem Straßennetz vergleichen. Dabei gibt es durch die Straßen gewisse Eingrenzungen, die einem nicht jedes Querfeldeinfahren erlauben. Solche Rahmenbedingungen stellen auch die Gesetze der Physik für den Problemlöseprozess dar. Nun ist durch die Kenntnis der erlaubten Wege noch lange nicht der beste oder der zielführende Weg beschrieben. Es gilt die Möglichkeiten, die sich bieten, geschickt zu kombinieren um möglichst elegant ans Ziel zu gelangen. Dazu sind anleitende Denkschemata nötig. Im Bilde des Straßennetzes meint dies die Prioritätensetzung auf den kürzesten Weg, den sparsamsten, den stressfreiesten usw. Analog müssen im physikalischen Problemlöseprozess gewisse Leitideen die Richtung weisen. Zur weiteren inhaltlichen Vertiefung sollen einige Be-

griffe für diesen Vortrag ausformuliert werden<sup>1</sup>. Da ist zunächst der Begriff des physikalischen Gesetzes. Dieses meint die mathematische Beschreibung der Regelmäßigkeit eines Naturphänomens im eng begrenzten Sinne. Zum Beispiel die Abbildungsgleichung einer dünnen Linse. Mit diesem Gesetz kann man operieren, wenn man sich im Bereich der Optik bewegt, in anderen Teilgebieten der Physik ist dieses Gesetz nicht sehr nützlich um Probleme zu lösen. Anders verhält es sich hier mit Gesetzmäßigkeiten - darunter sollen nachfolgend allgemeingültige Grundregeln verstanden werden, die wir in fast allen Teilgebieten der Physik antreffen, beispielsweise den Energieerhaltungssatz. Solche Gesetzmäßigkeiten erlangen den Status eines Denkprinzips, wenn wir sie sowohl zur Beschreibung der Natur als auch als Analysewerkzeug zur Erforschung der Natur bzw. offener Problemstellungen einsetzen. Um im Bild des gerade gegebenen Beispiels zu bleiben: Ein kompliziertes System lässt sich gewiss analysieren, indem man versucht Energieflüsse im System oder über die Systemgrenzen hinweg mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes zu analysieren. Die physikalische Gewissheit, dass dieses System der Energieerhaltung unterworfen sein muss lenkt unser Denken in erfolgversprechende Bahnen. Folglich verstehen wir unter einem Denkprinzip eine allgemeingültige Denkweise der Physik, die den Charakter eines Problemlösewerkzeugs hat.

## 2. Der Erhaltungsgedanke in der Physik

Es ist klar, dass die soeben erläuterten Begriffe, insgesamt von großer Bedeutung für den Problemlöseprozess in der Physik sind. Wie bereits erwähnt, ist uns der Erhaltungsgedanke in verschiedenen Facetten als physikalisches Gesetz mit klar umgrenzten Gültigkeitsbereichen bekannt. Da wäre z.B. der Impulserhaltungssatz der Mechanik, der 1. Hauptsatz der Thermodynamik oder auch der Satz von Poynting zu erwähnen. Doch stellt der Erhaltungsgedanke bezogen auf einige physikalische Größen (Energie, Impuls, Masse, Ladung, Drehimpuls) auch eine allgemeingültige Grundregel der Physik dar, die es überall zu beachten gilt. Dieser Charakter einer Gesetzmäßigkeit lässt sich auch festmachenbeschreiben, dass einige Gesetze, im oben erwähnten Sinne, die scheinbar nichts mit Erhaltung zu tun haben, doch nur eine spezielle Form der Gesetzmäßigkeit der Erhaltung darstellen. Als Beispiel könnte man die lenz'sche Regel anführen. Diese scheint in keiner Form etwas mit Erhaltung zu tun zu haben, doch ist die Begründung dieser Regel nichts anderes als die Gesetzmäßigkeit der Energieerhaltung. In Kurzform: Mittels Induktion

lässt sich kein Perpetuum mobile kreieren, denn die induzierte Spannung wirkt ihrer Entstehungsursache entgegen.

Aber auch dem Begriff des Denkprinzips, lässt sich der Erhaltungsgedanke zuordnen. Dies wird vor allem aus der historischen Analyse der Physik ersichtlich, denn immer wieder ist der Erhaltungsgedanke als zündender Funke oder auch als mahndendes Gewissen auf der Bühne der Physikgeschichte aufgetreten. Als Beispiel ließe sich Huygens anführen, der durch die Idee der Erhaltung des virtuellen Schwerpunkts Stoßprozesse gut beschreiben konnte. Aber auch in der jüngeren Geschichte war der Erhaltungsgedanke erkenntnisleitend. So hat beispielsweise Wolfgang Pauli durch das Festhalten am Energieerhaltungssatz, der scheinbar mit der Beschreibung des  $\beta$ -Zerfalls im Widerspruch stand, ad-hoc eine neue Teilchenart postuliert, die sich einige Jahre später auch experimentell bestätigen ließ (für nähere Erläuterungen siehe [3]). Somit könnten wir mit Blick auf unseren Physikunterricht festhalten, dass Schülerinnen und Schüler den Erhaltungsgedanken in seinen Formulierungen als physikalisches Gesetz kennen sollten, aber auch darüber hinaus dafür sensibilisiert werden müssen, dass der Erhaltungsgedanke eine allgemeingültige Grundregel der Physik darstellt. Bezüglich des Problemlösens sollten Lernende den Nutzen des Erhaltungsgedankens als Problemlösewerkzeug kennenlernen, der, wie wir gesehen haben, in der Physikgeschichte immer wieder erkenntnisleitend war und auch heute noch als Denkschemata genutzt werden kann, soll und muss.

## 3. Ein Blick in die Schulbuchpraxis: Wie wird der Erhaltungsgedanke vermittelt?

Nutzen wir die gerade hergestellte begriffliche Klarheit, indem wir uns fragen, ob und wie die drei Aspekte Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkprinzip am Beispiel des Erhaltungsgedankens an Lernende vermittelt werden. Besonderes Augenmerk soll dabei natürlich auf der Nutzung als Denkprinzip liegen. Als globaler Zugang soll dazu eine Analyse von Schulbüchern für die Gymnasiale Oberstufe dienen. Es wurden sechs gängige Gesamtwerke ([4]-[9]) unter der Frage durchgesehen, wo und wie der Erhaltungsgedanke implizit oder explizit erwähnt wird. Dabei wurde bezüglich der drei Begriffe Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkprinzip differenziert. Die Tabellen im Anhang geben eine Übersicht über die Anzahl der Fundstellen<sup>2</sup>. Dabei sind die Quotienten in der zweiten Spalte wie folgt zu verstehen: 2/5 würde bedeuten, dass in den sechs durchgesehenen

<sup>1</sup> Dabei bin ich mir bewusst, dass diese Begriffe in anderen Zusammenhängen auch anders definiert werden können. Die von mir beigemessene Bedeutung ist speziell für diesen Vortrag konzipiert.

<sup>2</sup> In meiner Dissertation werden diese nach der qualitativen Inhaltsanalyse von Mayring [10] genauer ausgewertet.

Schulbüchern der benannte Sachverhalt fünf Mal thematisiert wurde und dabei zwei Mal mit Erwähnung des Erhaltungsgedankens.

In der Tabelle 1 sind die Fundstellen bezüglich des Erhaltungsgedankens als Gesetz aufgelistet (siehe Anhang). Diese Auflistung ist zunächst nicht überraschend. Der Erhaltungsgedanke wird in den typischen Formen als Gesetz thematisiert.

Die Tabelle 2 gibt die Auflistung der Verwendungen des Erhaltungsgedankens als Gesetzmäßigkeit wieder (siehe Anhang). Die Länge dieser Tabelle zeugt anscheinend von einer vielfachen Betonung des Erhaltungsgedankens in den Schulbüchern. Demzufolge wird in diesen Werken eine Vielzahl von Gesetzen und Phänomenen auf den Erhaltungsgedanken zurückgeführt. Wenn man jedoch genauer hinschaut, so wird dieser positive Eindruck durch die jeweilige geringe relative Häufigkeit gedämpft. So wird beispielsweise der Raketenantrieb, der in fünf der durchgesehenen Schulbüchern thematisiert wird, nur zweimal mit Betonung auf dem Erhaltungsgedanken erklärt, obwohl die Impulserhaltung die zentrale Rolle beim Raketenantrieb spielt.

In der Tabelle 3 sind die Fundstellen bezüglich des Erhaltungsgedankens als Denkprinzip aufgelistet (siehe Anhang). Auch diese Tabelle ließe sich zunächst positiv bewerten: Der Erhaltungsgedanke wird in Schulbüchern als Denkschemata bzw. Problemlösewerkzeug erwähnt bzw. verwendet. Doch ebenso wie schon bei der Gesetzmäßigkeit fällt auch hier wieder die geringe relative Häufigkeit ins Auge. Wenn man noch genauer hinsieht, so stellt man fest, dass die meisten Fundstellen in einen sehr allgemeinen Kontext eingebettet sind (in der Tabelle mit A gekennzeichnet). Wenn der Erhaltungsgedanke als Denkprinzip erwähnt wird, dann nicht als konkretes Problemlösewerkzeug sondern als allgemeines Metaprinzip, welches kaum praktischen Nutzen aufweist. Wenn es dann praktisch angewandt wird, dann in der Mechanik (in der Tabelle mit M gekennzeichnet). In anderen Teilgebieten ist der Problemlösecharakter des Erhaltungsprinzips kaum bis gar nicht erwähnt. Das enttäuscht, da z.B. die Thermodynamik den Energieerhaltungssatz als 1.Hauptsatz kennt, der pragmatische Nutzen daraus aber vielfach unter den Tisch fallen gelassen wird.

#### 4. Zusammenfassung

Der Erhaltungsgedanke ist in der Physik mehr als nur ein Naturgesetz – er ist als Leitidee und mahnendes Gewissen, spricht als Denkprinzip, von tragender Bedeutung. In Unterrichtsgeschehen wird

dies – so die vorläufige Einschätzung anhand der analysierten Lehrbücher - nur sehr begrenzt umgesetzt. Wohl wird er in verschiedenen Formen als Naturgesetz vorgestellt, den Charakter eines Denkwerkzeugs verliert er jedoch in der Darstellung der Schulbücher weitgehend. Wir als Lehrende der Physik sollten darin einen Handlungsbedarf erkennen, wenn wir das angestrebte Ziel der Entwicklung von Problemlösekompetenz tatsächlich ernst nehmen. Nutzen wir die Werkzeuge, die uns die Physik an die Hand gibt!

#### 5. Literatur

- [1] Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik; Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 01.12.1989 i.d.F. vom 05.02.2004
- [2] Müller, Rainer (2001): Fermiprobleme als Beitrag einer neuen Aufgabenkultur. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 8/50, S.2-7
- [3] Schirra, Norbert (1989): Die Entwicklung des Energiebegriffs und seines Erhaltungskonzepts, Dissertation im Fachbereich Physik der Justus-Liebig-Universität Gießen
- [4] Meyer, Lothar und Schmidt, Gerd Dietrich (Hrsg.): Physik – Gymnasiale Oberstufe, Duden Patec Schulbuchverlag, 1.Auflage, Berlin, 2003
- [5] Diehl, Bardo et al.: Physik – Oberstufe Gesamtband, Cornelsen Verlag, 1.Auflage, Berlin 2008
- [6] Bader, Franz (Hrsg.): Physik – Gymnasium Sek II, Schroedel, Braunschweig, 2010
- [7] Grehn, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, Schroedel, Braunschweig 2007
- [8] Kuhn, Wilfried: Kuhn Physik 2, Westermann, Braunschweig, 2000
- [9] Bredthauer, Wilhelm et al: Impulse Physik – Oberstufe, Ernst Klett Verlag, 1.Auflage, Stuttgart, 2007
- [10] Mayring, Philipp: Qualitative Inhaltsanalyse – Grundlagen und Techniken, Beltz Verlag, Weinheim/Basel, 11.Auflage, 2010

## 6. Anhang

Wie oft wurde der Erhaltungsgedanke als Gesetz erwähnt?	
Bezeichnung der Fundstelle	Mit Erhaltung behandelt/ Bezugsthema allgemein behandelt
Impulserhaltungssatz	5/5
Drehimpulserhaltungssatz	5/5
Energieerhaltungssatz allgemein	5/6
1.HS als Energieerhaltungssatz	5/6
Energieerhaltungssatz der Mechanik	4/5
Schwerpunkterhaltung	4/5
relativistische Erhaltungssätze	4/6
Ladungserhaltung	3/6
Energieerhaltungssatz allgemein für TD formuliert	1/6
Massenerhaltung	1/6

Tabelle 1: Der Erhaltungsgedanke als Gesetz in den untersuchten Schulbüchern

Wie oft wurde der Erhaltungsgedanke als Gesetzmäßigkeit erwähnt?	
Bezeichnung der Fundstelle	Mit Erhaltung behandelt/ Bezugsthema allgemein behandelt
Energie- und Impulserhaltung bei Stoßprozessen	5/5
Energieerhaltung zur Erklärung der lenz'schen Regel	6/6
Energie- und Impulserhaltung beim Comptoneffekt	4/6
Energieerhaltung bei Satellitenbahnen	2/3
Energieerhaltung beim harmonischen Oszillator	3/5
Energieerhaltung beim mathematischen Pendel	3/5
Energieerhaltung im Interferenzbild	3/6
Energieerhaltung bei Resonanzfluoreszenz	1/2
Drehimpulserhaltung bei Sternentstehung	2/5
Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile	2/5
Raketenprinzip über Impulserhaltung	2/5
Äquivalenz zwischen Energie- und Massenerhaltung	2/6
Impulserhaltung zur Erklärung des rutherford'schen Streuversuches	2/6
Impuls- und Energieerhaltung als Grenzen der Paarerzeugung	2/6
Energieerhaltung im Schwingkreis	2/6
Reibung und Energieerhaltung	2/6
Kirchoff'sche Maschenregel als Anwendung der Energieerhaltung	1/3
Kirchoff'sche Knotenregel als Anwendung der Ladungserhaltung	1/3
Drehimpulserhaltung beim Kreisel	1/4
Anwendungen des Impulserhaltungssatzes	1/5
Anwendungen des Drehimpulserhaltungssatzes	1/5
Energieumwandlung bei induktiven und kapazitiven Widerständen	1/5
Kepler'sches Gesetz als Anwendung des Drehimpulserhaltungssatzes	1/5
Ladungs-, Baryonen- und Impulserhaltung zur Herleitung der relativistischen Impulsenergie	1/6

Gammastrahlung bei Paarvernichtung aufgrund von Impulserhaltung	1/6
Massenerhaltung als grundlegendes Prinzip bei chemischen Reaktionen	1/6
Energieerhaltung beim Aufladen eines Kondensators	1/6
Massenerhaltung zur Begründung der Relativität der Masse	1/6
Teilchenerhaltung bei Kernreaktionen	1/6
Energieerhaltung beim Transformator	1/6
Energieerhaltung bei kreisenden Elektronen	1/6
Energie des Magnetfeldes	1/6
Energieerhaltung beim -transport von Wellen	1/6
Energieerhaltung beim Tunneleffekt	1/6

**Tabelle 2: Der Erhaltungsgedanke als Gesetzmäßigkeit in den untersuchten Schulbüchern**

<b>Wie oft wurde der Erhaltungsgedanke als Denkprinzip erwähnt?</b>	
<b>Bezeichnung der Fundstelle</b>	<b>Mit Erhaltung behandelt/ Bezugsthema allgemein behandelt</b>
Findung des Antineutrinos zur Sicherstellung des Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltungssatzes	5/6
Geschichte des Energieerhaltungssatzes	3/6 <b>A</b>
Energieerhaltung als Lösungswerkzeug mechanischer Probleme	2/5 <b>M</b>
Energieerhaltung führt zum Optimismus im 19. Jh.	2/5 <b>A</b>
Herleitung des Impulserhaltungssatzes nach Huygens	2/5 <b>M</b>
Grenzen der Anwendbarkeit der Energieerhaltung in der Mechanik	1/5 <b>M</b>
Energieerhaltung zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Geschosses	1/5 <b>M</b>
Erhaltungssätze als allgemeine Lösungswerkzeuge in der Physik	1/6 <b>A</b>
Implizite Anspielung auf Massenerhaltung zum Aufgabenlösen in der Mechanik	1/6 <b>M</b>
Aufgabe zur Mechanik soll mit Energieerhaltung gelöst werden	1/6 <b>M</b>
Symmetrie und Erhaltungssätze	1/6 <b>A</b>
Probleme der gegenwärtigen Energienutzung mit Energieerhaltung	1/6
Implizite Anspielung auf Energieerhaltung zum Aufgabenlösen in der Mechanik	1/6 <b>M</b>
Gilt die Energieerhaltung in der SRT?	1/6
Aufgabe zur TD mit Energieerhaltung	1/6 <b>M</b>
Energieerhaltung als Denkwerkzeug in der Mechanik	1/6 <b>M</b>
Bilanzierungsstrategie mit Energieerhaltung	1/6 <b>A</b>

**Tabelle 3: Der Erhaltungsgedanke als Denkprinzip in den untersuchten Schulbüchern**