

Die Maxwellgleichungen: „War es ein Gott, der diese Zeilen schrieb?“ - Notizen zur gedanklichen Genese der Maxwellgleichungen -

Adel Moussa

Institut für Didaktik der Physik
Westfälische Wilhelms-Universität
Wilhelm-Klemm-Str. 10
D-48149 Münster
a_mous01@uni-muenster.de

Kurzfassung

Mit völlig veränderter Konnotation scheint die im Titel dieses Beitrags zitierte Frage Ludwig Boltzmanns auch mehr als 100 Jahre nach der Veröffentlichung seiner Vorlesungsreihe zur Elektrodynamik stets in der Luft zu liegen, wenn Studenten/innen in der "Einführung in die Elektrodynamik" mit den Ergebnissen einer Theorie konfrontiert werden, die nur noch im mathematischen Formalismus Spuren jener mechanistischen Analogie aufweist, aus der sie einst hervorgegangen ist. Die in diesem Beitrag unternommene Wiederbelebung der "Kraftlinien", "Wirbel" und "Kugellager", die Maxwells Vorstellung bei der Formulierung seiner ehemals acht Gleichungen leiteten, ist daher nicht nur unter erkenntnistheoretischen und fachhistorischen Gesichtspunkten interessant. Sie stellt zugleich die ursprüngliche Anschaulichkeit der Gleichungen wieder her, deren kritische Reflexion, obwohl sie für die mathematisch-physikalische Beschreibung und Vorhersage der Phänomene nicht relevant sein mag, sich im Sinne eines "Lernens über Physik" als geradezu elementar erweist.

1. Einführung

Die Maxwellgleichungen, so wird angehenden Physikern und Physiklehrern in der „Einführung in die Elektrodynamik“ vermittelt, gehören zu jener Handvoll physikalischer Grundgleichungen, die ein jeder Physiker kennen und jederzeit fehlerfrei wiedergeben können sollte. Diese außergewöhnliche Wertschätzung für den mathematischen Formalismus der maxwell'schen Theorie steht in einem gewissen Gegensatz zu der Gleichgültigkeit, mit welcher die moderne Elektrodynamik ihrer eigenen gedanklichen Herkunft begegnet. Bei vielen Studienanfängern mischt sich daher in die rationale *Bewunderung* für die Erklärungsmächtigkeit der Gleichungen eine *Verwunderung*, wie sie bereits in jenem, im Titel dieses Beitrags zitierten, leicht abgewandelten Vierzeiler aus Goethes Faust (*Der Tragödie erster Teil*) mitschwingt, den Ludwig Boltzmann dem zweiten Teil seiner „Vorlesung über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichts“ (1893) als Geleitwort voranstellte:

„War es ein Gott der diese Zeichen schrieb,
Die mit geheimnisvoll verborg'nen Trieb
Die Kräfte der Natur um mich enthüllen
Und mir das Herz mit stiller Freud erfüllen?“

Der durch die in vier einfachen Differenzialgleichungen geordneten „Zeichen“ initiierte Paradigmenwechsel erscheint schlicht zu tiefgreifend, als dass der „verborg'ne Trieb“, welcher hinter den „Zeichen“ stehend die „Kräfte der Natur“ zu allererst zu „enthüllen“ ver-

mochte, allein der Forschergeist eines gewöhnlichen Menschen hätte sein können („War es ein Gott [...]?“).

Der an diesen Zweifel geknüpften Frage nach der gedanklichen (nicht etwa der historischen) Entstehungsgeschichte der Maxwellgleichungen nachzugehen, stellt daher das vordergründige Ziel dieses Beitrags dar. Zu diesem Zweck wird eine bereits zu Boltzmanns Zeiten von Vielen als „dunkel und inconsequent“ [1] erlebte und aus dem Kontext der modernen Elektrodynamik längst verdrängte mechanistische Analogie wiederbelebt, deren konstitutive Rolle bei der Entwicklung der maxwell'schen Theorie in der (Hochschul-)Lehre bisher kaum Berücksichtigung findet. Formal-mathematische, aber auch wissenschaftshistorische Aspekte spielen dabei in der folgenden Analyse eine eher untergeordnete Rolle. Ihr Hauptanliegen ist vielmehr die Vermittlung eines qualitativen Verständnisses für die Funktionalität des Modells, das im Hinblick auf die „formative“ [2] Rolle „physikalischer Analogien“ [3] bei der Entwicklung der modernen Physik auch unter wissenschaftstheoretischen Gesichtspunkten als exemplarisch anzusehen ist.

2. Von Faradays „Electrotonic State“ zu Maxwells Wirbelanalogie

Die Mechanik des maxwell'schen Analogiemodells stützt sich im wesentlichen auf zwei Grundannahmen, die Maxwell selbst erst im vierten und letzten Teil seines in den Jahren 1861-1862 in vier Kapiteln in den

Publikationen der *London, Edinburgh and Dublin Philosophical Society* erschienen Papers „*On Physical Lines of Forces*“ mit Verweisen auf bereits bekannte Phänomene rechtfertigt: Da wäre zum einen die Beobachtung des Ladungsträgertransports bei der Galvanischen Zelle, welche Maxwell als deutlichen Hinweis auf den Flusscharakter des elektrischen Stroms deutet (heute \rightarrow Maxwell 1: $\nabla D = \rho_f$); zum anderen die von Faraday beschriebene Polarisationsdrehung des Lichts beim Durchgang durch ein von „magnetischen Kraftlinien“ erfülltes Medium [4], die Maxwell als eindeutiges Indiz für den zirkulären Charakter des Magnetismus wertet (heute \rightarrow Maxwell 2: $\nabla B = 0$).

Auf Basis dieser Grundannahmen und unter Rückgriff auf Experimente sowie theoretisch-qualitative Überlegungen Faradays konstruiert Maxwell ein mathematisch-geometrisches Modell, welches den von Faraday als „electrotonic state“ (heute \rightarrow Vektorpotential A) bezeichneten Spannungszustand der Trägermedien „elektrischer und magnetischer Materie“, sowie die von ihnen hervorgerufenen¹ elektrischen und magnetischen Phänomene ohne Rückgriff auf die zu dieser Zeit von vielen Physikern favorisierte Fernwirkungshypothese zu erklären vermag.

Die zentrale Hypothese dieses Modells, dessen illustrativen, d.h. in diesem Fall, die Gedanken leitenden, Charakter Maxwell auch in späteren Publikationen [5] immer wieder hervorhebt, ist die Existenz „molekularer Wirbel“ in einem, beiden Phänomenbereichen (Elektrizität und Magnetismus) gemeinsamen, Trägermedium.

Aus heutiger Sicht mag das daran geknüpfte, bei William Thomson entlehene² Postulat rotierender Materiewirbel unsinnig, oder wenigstens überflüssig erscheinen. Zur Mitte des 19. Jahrhunderts, dem Zeitalter der großen Maschinen und mechanischen Apparate, war diese Vorstellung allerdings nicht nur naheliegend, sie war vor allem zugänglicher, oder wie Maxwell selbst schreibt, „way more intelligible to many minds“ [6], als es eine Sammlung abstrakt-mathematischer Theoreme je hätte sein können.

Einige Jahre später, in einem Vortrag vor der mathematisch-philosophischen Sektion der *British Association*, nimmt Maxwell explizit Stellung zu Nutzen und Grenzen derartiger Denkwerkzeuge bzw. „wissenschaftlicher Illustrationen“:

„Eine wahre wissenschaftliche Illustration [erlaubt] es dem Verstand, Konzepte aus einem Be-

¹ Man beachte die zentrale Rolle, welche dem mit der Formulierung der QED abermals ins Blickfeld phys. Forschung gerückten Vektorpotential bei der Genese der Theorie zukommt.

² In einem Brief an Thomson erklärt Maxwell, dass er beabsichtigt dieses Konzept zu „borgern“ und fügt humorvoll hinzu, dass er hoffe, Thomson habe es nicht bereits „patentieren“ lassen [8].

reich der Wissenschaft zu verstehen, indem sie ihm ein Konzept oder ein Gesetz aus einem anderen Teil der Wissenschaft zeigt und die Aufmerksamkeit auf die mathematische Form lenkt, die beiden Wissenschaften gemein ist. Dabei lässt sie die Unterschiede in der physikalischen Natur der realen Phänomene zunächst außer Acht.“ [3]

Wenn im Folgenden also davon die Rede sein wird, dass „molekulare Wirbel“ eine Ausdehnung der „magnetischen Materie“ in der Rotationsebene bewirken und auf diese Weise im sie beherbergenden Medium eine Spannung entlang der Rotationsachse hervorrufen (heute $\rightarrow \nabla \times A = B$), dann hat Maxwell damit nicht die „physikalische Natur“ [4] magnetischer Phänomene im Sinn. Er beschreibt damit lediglich die Mechanik eines Analogmodells, welches ihm einen mathematischen Formalismus liefert, dessen erst im Nachhinein vorgenommene physikalische Interpretation einen einschneidenden Umbruch im damaligen Verständnis elektrischer, magnetischer und optischer Phänomene nach sich ziehen würde.

2.1. Ein funktionsfähiges mechanisches Modell für Elektrizität und Magnetismus

Die Grundannahme, dass die Spannungsgradienten entlang derer die Faraday’schen Kraftlinien verlaufen in Folge der Rotation „molekularer Wirbel“ entstehen, gestattet Maxwell die Quantität der mechanischen Spannungen $p_{x,y,z}$ in Abhängigkeit von der Tangentialgeschwindigkeit v (mit $p \propto v$) und dem Quadrat der Dichte ρ^2 (mit $p \propto \rho^2$) der rotierenden „magnetischen Materie“ zu bestimmen und auf diese Weise eine Verbindung herzustellen, zwischen dem Faraday’schen „electrotonic state“ (zur Erinnerung: dem heutigen Vektorpotential A) und den „magnetischen Kraftlinien“, die bei Maxwell per Definition stets von Raumgebieten hohen Drucks zu Raumgebieten niedrigen Drucks verlaufen.

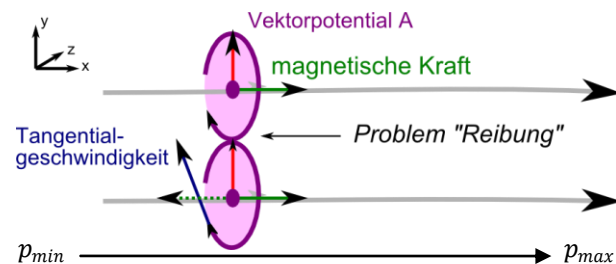


Abbildung 1: Wirbel im Medium verursachen „magnetische Kraftlinien“ entlang ihrer Rotationsachsen

Dabei genügt, anders als es für ein System abstrakter Gleichungssysteme der Fall wäre, bereits das Wissen um ganz alltägliche mechanische Prozesse, um zu erkennen, dass ein reales mechanisches Modell des in Abbildung 1 dargestellten Mechanismus kaum funktionsfähig wäre: schließlich würden sich die gleichgerichtet rotierenden Wirbel, die in der (heute) klassischen Elektrodynamik als Vektorpotential A nur noch in Ge-

stalt einer abgeleiteten Größe in Erscheinung treten, gegenseitig ausbremsen. Die von ihnen hervorgerufenen Spannungen würden ausgeglichen und die magnetischen Kräfte verschwinden.



Abbildung 2: Durch die einem Kugellager ähnlichen „elektrischen Partikel“ bleibt die Rotationsfähigkeit gleichgerichtet drehender Wirbel erhalten.

Maxwell, der sich dieses Problems durchaus bewusst war, begegnet ihm ganz in der Tradition der Ingenieure des 19. Jahrhunderts und statet die Zwischenräume zwischen den Wirbeln mit einer Lage imaginärer „elektrischer Partikel“ aus (vgl. Abbildung 2). Wie ein reibungsfreies, bewegliches Kugellager ermöglichen diese Partikel nicht nur die gleichgerichtete Rotation der Wirbel, sie liefern Maxwell darüber hinaus das mechanische Bindeglied zwischen den lange Zeit unabhängig voneinander gedachten magnetischen und elektrischen Kräften.

2.2. Wirbel, Ströme und elektrische Verschiebungen

In einem homogenen Magnetfeld, in dem die Tangentialgeschwindigkeiten v_1 und v_2 zweier benachbarter Wirbel identisch sind, drehen sich die zwischen den Wirbeln befindlichen „elektrischen Partikel“ entgegen der Rotationsrichtung der sie antreibenden magnetischen Wirbel (vgl. Abbildung 2). Da auf sie demnach keine translative „elektromotorische Kraft“ wirkt, findet weder ein Ladungstransport in Gestalt eines Stroms noch eine Ladungsverschiebung der „elektrischen Partikel“ statt.

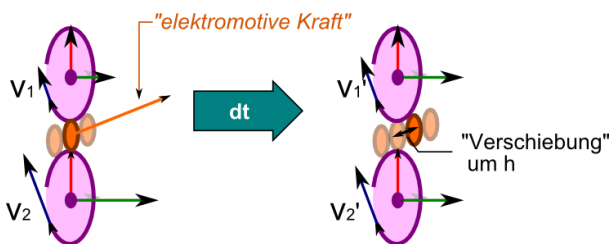


Abbildung 3: Das qualitative Verständnis dafür, dass eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen benachbarten Wirbeln die dazwischen befindlichen „elektrischen Partikel“ in Bewegung setzt, bedarf keiner komplexen mathematischen Formalismen.

Ganz anders als im zuvor diskutierten Fall verhält es sich, wenn sich die Tangentialgeschwindigkeiten v_1 und v_2 benachbarter Wirbel unterscheiden. Ist die Tangentialgeschwindigkeit v_1 von Wirbel 1 kleiner als die Ge-

schwindigkeit v_2 von Wirbel 2 (vgl. Abbildung 3), so wirkt eine „elektromotorische Kraft“, welche die „elektrischen Partikel“ aus ihrer Ausgangsposition auslenkt.

Die Größe dieser „elektrischen Verschiebung“ pro Zeiteinheit hängt dabei nicht allein von der Geschwindigkeitsdifferenz der Wirbel ab, sondern wird ganz entscheidend von den Leitungseigenschaften des sie beherbergenden Mediums beeinflusst. Während sich im Leiter ein Teil der „elektrischen Partikel“ frei bewegen kann (bei Maxwell: „free charge“ j_f) und über die Wirbel einen von der „magnetischen Intensität“ $H = \mu_0 \mu_r (\nabla \times A)$ abhängigen Stromfluss $\nabla \times H = j_f$ hervorruft, sind die „elektrischen Partikel“ dielektrischer Medien Maxwells Theorie zufolge mehr oder weniger fest an ihre Positionen im Medium gebunden.

In der Mechanik des Analogiemodell ist daher *unmittelbar* einsichtig, dass es neben dem bereits bekannten Leitungsstrom j_f noch eine weitere Form des Ladungstransports geben muss, bei dem die Ladungsträger, anstatt „von einem Molekül zum anderen zu wandern“ [4] nur unwesentlich aus ihrer Ausgangsposition ausgelenkt werden. Da Maxwell dieser elektrischen Verschiebung die gleichen Eigenschaften zuschreibt, wie einem „gewöhnlichen“ [4] Strom, ist es offensichtlich, dass der Gesamtstrom j_{ges} im Allgemeinen zwei Komponenten aufweisen wird: den Leitungsstrom j_f und den Verschiebestrom $\frac{\delta D}{\delta t}$.

3. Vom Analogmodell zum revolutionär neuen wissenschaftlichen Paradigma

Es ist nun eine wesentliche Erwartung an jede neue wissenschaftliche Theorie, dass sie dort, wo sie nicht ohnehin auf die Ergebnisse anerkannter Theorien zurückgreift, deren vielfach experimentell verifizierte Voraussagen zu reproduzieren vermag. Das von Maxwell in „On Physical Lines of Forces“ ausführlich diskutierte Beispiel des Stromflusses durch einen Leiter ist vor diesem Hintergrund zunächst einmal als Demonstration der Funktionsfähigkeit des zuvor entwickelten Mechanismus zu verstehen.

Über die bloße Reproduktion etablierter Erkenntnisse hinaus, eröffnet Maxwells Modell eine völlig neue Sehweise auf elektrische und magnetische Phänomene. Dieser Perspektivwechsel, der in der Folge zu einem der wesentlichen Paradigmenwechsel der modernen Physik führen würde, ist es, der Maxwell jene Einsichten in den Zusammenhang zwischen dem nicht-observablen Zustand des Trägermediums und den experimentell zugänglichen elektrischen und magnetischen Kräften gewährt, welche im Sinne des Eingangs wiedergegebenen Faust-Zitats allzu leicht als eine Art gottgegebener Erleuchtung missverstanden werden könnten.

Es ist dabei als ein Charakteristikum der modernen theoretischen Physik anzusehen, dass etliche der am Modell gewonnenen Hypothesen erst Jahre später (im

Fall „elektromagnetischer Wellen“ erst nach Maxwells Tod durch Heinrich Hertz im Jahr 1887) experimentell verifiziert werden können.

3.1. Die Mechanik des maxwell'schen Modells erläutert am Stromfluss im Leiter

Abbildung 4 zeigt eine adaptierte Version einer Darstellung, welche Maxwell in der Originalpublikation [4] zur Diskussion des Ladungstransports im Leiter heranzieht: Die in den Reihen A, B und C angeordneten hexagonalen Zellen repräsentieren die molekularen Wirbel. Länge³ und Orientierung der in den Zellen befindlichen Pfeile indizieren Rotationsgeschwindigkeit und -richtung der Wirbel. Die Plus- und Minuszeichen im Zentrum der Zellen geben die korrespondierende Richtung des Magnetfelds an: plus für aus der Papierebene hinaus, minus für in die Papierebene hinein.

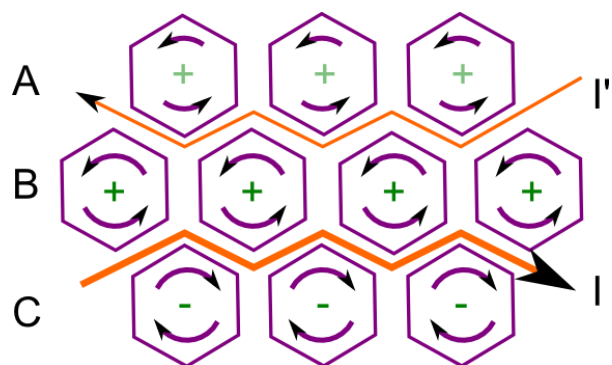


Abbildung 4: Adaption einer Darstellung Maxwells zur Erläuterung der Effekte eines Stroms auf Wirbel und elektrische Partikel im Medium

Der zwischen den Zeilen B und C fließende Strom I^4 setzt die angrenzenden Wirbel gegenläufig in Bewegung. Die Rotationsgeschwindigkeit der Wirbel der Zeile B liegt in der Folge temporär über derjenigen der Zeile A, so dass zwischen den Wirbeln dieser Zeilen ein Ladungstransport entgegen der Richtung des Primärstroms stattfindet. Dieser Sekundärstrom bleibt solange erhalten, bis die Geschwindigkeitsdifferenz der Wirbel und mit ihr die auf die „elektrischen Partikel“ wirkende „elektromotorische Kraft“ verschwunden ist.

Versiegt nun der Primärstrom I , bremsen die gegenläufig rotierenden Wirbel der Zeilen B und C einander aus. Durch die Wirbel der Reihe C abgebremst, ist die Rotationsgeschwindigkeit der Wirbel der Reihe B nun kurzzeitig geringer als die der Reihe A. Es wirkt daher eine „elektromotorische Kraft“ in Richtung des Primärstroms (in Abbildung 4 nicht dargestellt), welcher diese Kaskade in Gang setzte.

Aus der Mechanik dieses Modells, das sich unter Be-

³ In der Originaldarstellung hat Maxwell auf die grafische Unterscheidung der Geschwindigkeiten verzichtet.

⁴ Auf die Darstellung bewegter „elektrischer Partikel“ wurde im Hinblick auf eine größere Übersichtlichkeit verzichtet.

rücksichtigung entsprechender Rückstellkräfte auch auf den Fall eines dielektrischen Mediums anwenden lässt, leitet Maxwell folgende Beziehung zwischen dem Leitungsstrom $\mathbf{j}_L = (p, q, r)$, der magnetischer Intensität $\mathbf{H} = (\alpha, \beta, \gamma)$ und der elektrischen Verschiebung $\mathbf{D} = (P, Q, R)$ her:

$$\mathbf{j}_L = \underbrace{\frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} \right)}_{\text{Ampère's Gesetz}} + \underbrace{\frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \right)}_{\nabla \times \mathbf{H}} + \underbrace{\frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right)}_{\text{Maxwell's „Erweiterung“}} + \frac{1}{\mathbb{E}^2} \frac{dP}{dt} + \frac{1}{\mathbb{E}^2} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{\mathbb{E}^2} \frac{dR}{dt} \quad (112)$$

Abbildung 5: Im Wissen um die von Maxwell verwendete Notation erkennt man in Gleichung 112 aus Maxwells „On Physical Lines of Forces“ [4] das verallgemeinerte Durchflutungsgesetz [die farbige Kennzeichnung wurde dem Original nachträglich hinzugefügt]

Diese Gleichung kennen wir heute unter anderem als „verallgemeinertes Durchflutungsgesetz“ oder „Ampère's Gesetz mit Maxwells Erweiterung“. Im Kontext der anfangs aufgeworfenen Frage nach der Genese der Maxwellgleichungen sind diese Bezeichnungen allerdings äußerst ungünstig gewählt. Sie reduzieren die Leistung Maxwells auf die „Erweiterung“ oder „Verallgemeinerung“ bereits bekannter Gleichungen und kollportieren damit einen Mythos, der, obschon er nie direkt ausgesprochen, doch stets mitgelehrt zu werden scheint, wenn in der „Einführung in die Elektrodynamik“ der Verschiebestrom, die entscheidende physikalische Innovation Maxwells, über Symmetrieüberlegungen oder die Unvereinbarkeit des Ampère'schen Gesetzes mit der Kontinuitätsgleichung im Nachhinein begründet wird. Tatsächlich aber, das sollten die bisherigen Ausführungen gezeigt haben, entstanden die „Maxwellgleichungen“ von Grund auf neu – aus dem oben vorgestellten, eigens zu diesem Zweck konstruierten mathematischen Analogmodell konnte Maxwell sie vor dem Hintergrund seines Wissens um mechanische und hydrodynamische Vorgänge gewissermaßen ablesen.

4. Vom didaktische Wert des Wissens um die Genese physikalischer Theorien

Das Wissen um die hier ausgeführte gedankliche Genese der Maxwell'schen Elektrodynamik mag für die mathematisch formalisierte Anwendung der Gleichungen wenig relevant sein. Im Hinblick auf ein tieferes Verständnis der zentralen Bedeutung physikalischer Analogien bei der Entwicklung neuer wissenschaftlicher Paradigmata ist es hingegen geradezu elementar. In diesem Zusammenhang zählen die stets selbstkritisch reflektierten Arbeiten Maxwells zweifellos zu jenen Kapiteln der jüngeren Geschichte der Physik, die in

besonders einsichtiger Weise vermitteln, wie „aus physikalischen Analogien zuweilen anerkannte physikalische Hypothesen“ [2] werden. Hierdurch veranschaulichen sie, wie Joseph Turner schreibt, auf geradezu „wunderbare“ Weise, „dass die Analogiemethode, um Maxwells eigene Worte zu gebrauchen, ‚science-forming‘ [wörtl. ‚die Wissenschaft formend‘]“ [2] ist.

Dieses zur Zeit in Schule und Hochschule allenfalls implizit mitgelernte Wissen um die formative Rolle physikalischer Analogien im Kontext fundamentaler wissenschaftlicher Entwicklungen, stellt m.E. für angehende Physiker und Physiklehrer einen ebenso wichtigen Lerngegenstand dar, wie die Beherrschung der aus der Anschauung⁵ hervorgegangenen mathematischen Formalismen, welche nach wie vor zentraler und oft einzig prüfungsrelevanter Lerninhalt vieler Vorlesungen und Lehrbücher zur Elektrodynamik sind.

Von einer stärkeren Betonung der gedanklichen Entstehungsgeschichte physikalischen Wissens, insbesondere in den Lehramtsstudiengängen, würde letztlich nicht nur die Hochschuldidaktik profitieren. Auch das falsche Wissenschaftsbild, das ein von historischen Anekdoten durchtränkter Physikunterricht in der Sekundarstufe in den Köpfen von Schülerinnen und Schülern hinterlässt, könnte durch die stärkere Berücksichtigung wissenschaftstheoretischer Lerninhalte in der Lehrerbildung und die nachfolgende Eingliederung entsprechender Inhalte in den Physikunterricht korrigiert oder zumindest relativiert werden. Von der Rekonstruktion nicht nur der Ergebnisse, sondern auch der zu ihnen hinführenden und z.T. in Vergessenheit geratenen Gedankengänge würde die Physikdidaktik somit auf zwei Ebenen profitieren: Zum einen *unmittelbar*, durch ein angemesseneres Wissenschaftsverständnis angehender Physiker und Physiklehrer; zum anderen *mittelbar* durch die erst dadurch möglich werdende Korrektur eines durch Medien wie Gesellschaft tradierten übersimplifizierten Wissenschaftsverständnisses auf Seiten der Schülerinnen und Schüler.

Wenn auf diese Weise der von Wagenschein stets betonte, der Physik innewohnende Konstruktionscharakter ein fester und wichtiger Bestandteil der Lehre an Schule und Hochschule geworden ist und Schüler und ihre zukünftigen Lehrer physikalische „Gesetze“ nicht mehr im Sinne der eingangs zitierten Verse aus Goethes Faust als „gott-“ bzw. autoritätsgegebene Wahrheiten zu akzeptieren lernen, dann kann es gelingen, dass auch die im Unterricht allgemein schweigende Mehrheit derjenigen, in deren Augen Physik zu den unbeliebtesten Fächern im breit gefächerten Lehrplan zählt, im Physikunterricht jene Faust'sche „Freud“ erleben, welche ein sich auf die Ergebnisse beschränkender (Lehr-)Gang durch die „Ausstellung der Funde einer abgeschlossenen Expedition“ [7] zu wecken bisher nicht im Stande

war.

5. Literatur

[1] Boltzmann, Ludwig. *Vorlesungen zu Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichts*. Leipzig: Metzger und Wittig, 1893. Bd. II.

[2] Turner, Joseph. "Maxwell on the Method of Physical Analogy". *Br J Philos Sci VI (23)*. 1955, S. 226-338.

[3] Maxwell, James Clerk. Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association. *British Association Report*. Liverpool: British Association, 1879. Bd. XL.

[4] —. "On Physical Lines of Forces". Parts I-IV. London, Edinburgh, Dublin: The Philosophical Society, 1861-1862.

[5] —. "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field". *Verhandlungen der Royal Society*. London: The Royal Society, 1864.

[6] —. "On Faraday Lines of Forces". Cambridge: The Cambridge Philosophical Society, 1855. S. 155-229.

[7] Wagenschein, Martin. "Zum Problem des genetischen Lehrens". *Verstehen Lehren*. Weinheim: Belz, 1999, S. 75-124.

[8] Maxwell, James Clerk. Letter from Maxwell to William Thomson. *Maxwell on heat and statistical mechanics: on "avoiding all personal enquiries" of molecules*. Cambridge: The Cambridge Philosophical Society, 15. May 1855. S. 171-172.

⁵ „Anschauung“ bezeichnet hier sowohl die real-experimentelle, als auch die imaginär-modellgeleitete Anschauung