
Laura Grabher-Meyer, Innsbruck/Wien

Die Brücke zwischen Elektrizität und Magnetismus

Die Maxwell-Gleichungen und ihre Vorläufer

Einleitung

Wer hat noch nie von ihnen gehört, den Maxwell-Gleichungen? Nicht nur in Physiker:innenkreisen, sondern auch in der breiten Öffentlichkeit sind diese mathematischen Meisterwerke vielen Menschen ein Begriff. Oftmals bleiben sie jedoch genau das: ein Fachterminus, der vom Hören-Sagen präsent ist, dessen weitreichende physikalische Bedeutung aber unbekannt ist oder unterschätzt wird. Maxwells Gleichungen haben wichtige Brücken gebaut, die heute eine zentrale Basis für die moderne Physik darstellen. Um diese Brücken verstehen zu können, sollen zunächst einzelne wichtige Physiker vorgestellt werden, welche die Grundpfeiler für Maxwells Arbeit gelegt haben. Basierend darauf erfolgt eine qualitative Diskussion der Maxwell-Gleichungen, um aufzuzeigen, wie innovativ und kompakt hier physikalische Erkenntnisse verwoben werden.

Das Oersted-Experiment

Die beiden zentralen physikalischen Phänomene (Kraftwirkungen), welche in den Maxwell-Gleichungen verarbeitet werden, sind Elektrizität und Magnetismus. In der Geschichte könnte man daher bis zur erstmaligen Entdeckung dieser beiden Phänomene zurückgehen. Da dies im gegebenen Rahmen jedoch zu weit führt, beschränkt sich dieser Artikel auf die zentralsten Erkenntnisse ab dem Beginn des 19. Jahrhunderts. Auch wenn es heute kaum mehr vorstellbar erscheint, galt zu dieser Zeit in der Physik die Annahme, dass die genannten Konzepte – Elektrizität und Magnetismus – voneinander vollkommen unabhängig wären (vgl. Hofmann 1987, S. 46). Erst im Jahr 1820 formte sich die Erkenntnis, dass dies nicht richtig

sein konnte (vgl. Roth & Stahl 2018, S. 253). Der Auslöser hierfür war ein Experiment von Hans Christian Oersted (vgl. ebd.). Als Oersted bei einem seiner Versuche durch Zufall eine Kompassnadel nahe eines Drahtes platzierte, nahm er eine Bewegung der Nadel wahr, sobald er elektrischen Strom durch den Draht fließen ließ. Diesen Einfluss des elektrischen Stroms auf die Magnetnadel des Kompasses konnte er sich zunächst nicht erklären (vgl. ebd.). Seinem Wissensstand zufolge wäre eine Ablenkung der Magnetnadel nur unter Einfluss eines zweiten Permanentmagneten möglich gewesen. (Ein Permanentmagnet bezeichnet dabei einen Magneten, der dauerhaft magnetisch ist. Er entspricht damit der Art von Magneten, die aus dem Alltag bekannt sind.) Wie Oersteds Beobachtungen zeigten, hatte der Stromfluss eine ähnliche Auswirkung wie ein solcher Permanentmagnet (vgl. Brandt et al. 2021, S. 3). Dies wiederum bedeutete, dass entgegen aller bisherigen Erwartungen ein Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus herrschen musste: Hierfür bildete Oersted den Fachterminus „Elektromagnetismus“ (vgl. Mitolo & Araneo 2019, S. 7). In diesem Sinne war Oersted als Vorläufer von Maxwell bereits ein bedeutender Brückenbauer der Physik, denn ohne ihn wären diese Konzepte vorerst weiterhin isoliert betrachtet worden.

Andrè-Marie Ampères

Beitrag zum Elektromagnetismus

Oersteds Experiment wurde unter anderem vom Physiker André-Marie Ampère aufgegriffen und im Aufbau verfeinert. Wenngleich bereits Oersted feststellte, dass sich die Kompassnadel nicht parallel zum stromdurchflossenen Leiter ausrichtete,

konnte er keine exakte Aussage über das Richtungsverhältnis der beiden Komponenten treffen (vgl. Blondel & Benseghir 2017, S. 373). Ampère war der Ansicht, dass die Ursache der Uneindeutigkeit in einer Störung durch das Erdmagnetfeld liegt (vgl. ebd.). Er gestaltete demnach einen gekippten Versuchsaufbau, um eine Position zu erreichen, in der das Erdmagnetfeld keine störenden Kräfte ausüben konnte (vgl. ebd.). Das Ergebnis von Ampères Versuchen zeigte, dass die Kompassnadel sich im rechten Winkel zur Stromflussrichtung ausrichtet (vgl. ebd.). Damit wurde eine genauere Beschreibung dieses elektromagnetischen Phänomens ermöglicht.

Weiters startete Ampère auch den Versuch, ein theoretisches Modell für die beobachtete Interaktion zwischen Strömen und Permanentmagneten zu entwickeln. Er stellte sich vor, dass innerhalb eines jeden Permanentmagneten auf mikroskopischer Ebene ebenfalls elektrische Ströme fließen, welche dann mit externen Strömen interagieren (vgl. Hofmann 1987, S. 46). Auch wenn dies zur damaligen Zeit ein innovativer Erklärungsansatz war, entspricht diese Vorstellung nicht ganz der Realität. Vielmehr lassen sich die makroskopischen magnetischen Eigenschaften von Materialien auf mikroskopischer Ebene mittels atomarer magnetischer Dipolmomente beschrieben. Deren Anordnung beeinflusst die Stärke und Richtung eines Magnetfeldes (vgl. Tipler & Mosca 2019, S. 920–922). Da Ampère jedoch, wie beschrieben, der Ansicht war, dass die Wechselwirkung zwischen stromdurchflossenem Leiter und Permanentmagneten auf der Wechselwirkung zwischen Strömen basiert, war es für ihn weiters naheliegend, auch Kräfte zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern zu untersuchen. Er erkannte, dass auch hier abstoßende sowie anziehende Kräfte vorherrschen (vgl. Mitolo & Araneo 2019, S. 8; Hofmann 1987, S. 46). Solche stromdurchflossenen Leiter sind heute unter dem Begriff des Elektromagneten bekannt. Die beobachteten Beeinflussungen von Permanent- und Elektromagneten legten einen wichtigen Grundstein für den Feld-Begriff in der Physik (vgl. Hofmann 1987, S. 45). Ein Feld beschreibt nach heutigem Verständnis den Einfluss eines Objekts auf ein potenziell vorhandenes weiteres Objekt an einem beliebigen Ort im Raum (vgl. Lüders & Pohl

2018, S. 87). Felder können sich mit endlicher Geschwindigkeit, maximal jedoch mit Lichtgeschwindigkeit, im Raum ausbreiten und ordnen dabei jedem Punkt im Raum zu einer bestimmten Zeit einen bestimmten Wert einer physikalischen Größe zu (vgl. Wagner 2022, S. 152f.). Dies erklärt die einst widersprüchliche Beobachtung einer scheinbar instantanen Wechselwirkung zweier entfernter Objekte, beispielsweise zweier elektrischer Ladungen: Eine statische elektrische Ladung erzeugt ein Feld, welches den Raum prägt (vgl. ebd.; Osterhage 2024, S. 88). Wird nun eine zweite elektrische Ladung in dieses Feld hineingebracht, „spürt“ diese Ladung den veränderten Raum und die Ladung erfährt eine Kraft durch das lokal vorhandene Feld. Das lokale Feld ist hierbei zentral, da hiermit das Problem einer scheinbar instantanen Kraftwirkung zweier entfernter Objekte, welche Überlichtgeschwindigkeit erfordern würde, gelöst wird. Im Kontext der späteren Arbeiten von Maxwell ist sowohl das beispielhaft angeführte elektrische Feld, das von elektrischen Ladungen erzeugt wird, als auch das magnetische Feld – von Permanentmagneten oder elektrischen Strömen verursacht – relevant.

Abseits der Untersuchung von Wechselwirkungen vorhandener Ströme und Permanentmagneten stellte sich Ampère zudem die Frage, ob ein einzelner stromdurchflossener Leiter oder ein Permanentmagnet auch einen zusätzlichen Stromfluss hervorrufen könnte. Tatsächlich zeigte sich eben dieses Verhalten schließlich im Jahr 1822 in einem seiner Experimente (vgl. Hofmann 1987, S. 45). Eine theoretische Beschreibung dieses Phänomens gelang Ampère jedoch zu Lebzeiten nicht mehr (vgl. ebd.). Offenbar erkannte er nicht, dass die Existenz eines stationären Stromflusses oder eines unbewegten Permanentmagneten nicht ausreicht, um einen weiteren Stromfluss hervorzurufen. Wie sich später herausstellte, bedarf es stattdessen einer zeitlichen Änderung des ursprünglichen Stromflusses und des damit einhergehenden Magnetfeldes bzw. einer Bewegung des Permanentmagneten (vgl. ebd., S. 56). Hierfür waren die Arbeiten von Michael Faraday wegweisend.

Michael Faraday und das Induktionsgesetz

Nach siebenjähriger Beschäftigung mit Experimenten zur magnetischen Wirkung von Strömen gelang es Michael Faraday schließlich das Induktionsgesetz abzuleiten (vgl. Marinescu 2009, S. 261). Dieses besagt, dass ein zeitlich veränderliches Magnetfeld einen Stromfluss hervorruft („induziert“); hiermit zeigte er, was Ampère zwar bereits vermutet hatte, jedoch nie beweisen konnte (vgl. ebd.; Mitolo & Araneo 2019, S. 9). Für seine Experimente verwendete Faraday einen zylindrischen Permanentmagneten sowie eine kreisförmige Schleife aus elektrisch leitfähigem Material (vgl. Marinescu 2009, S. 262). Es zeigte sich, dass bei Ruhe der beiden Objekte kein Stromfluss in der Schleife messbar war (vgl. ebd.). Waren jedoch der Zylinder und die Schleife relativ zueinander in Bewegung, kam ein Stromfluss zustande (vgl. ebd.). Mit dem Induktionsgesetz festigte er die Brücke zwischen Elektrizität und Magnetismus, die Oersted und Ampère konstruiert hatten. Zudem verfeinerte Faraday das Induktionsgesetz qualitativ, indem er feststellte, dass die Richtung der relativen Bewegung zwischen Zylinder und Schleife die Umlaufrichtung des Stroms in der Schleife änderte (vgl. ebd., S. 263–264). Diese Beobachtung wurde später als Lenzsche Regel bekannt.

Die Lenzsche Regel hängt im Wesentlichen mit der Einhaltung der Energieerhaltung bei der magnetischen Induktion zusammen und gewährleistet, dass diese aufrechterhalten bleibt. Wie bereits erläutert, erzeugt ein Stromfluss stets ein magnetisches Feld. Im Fall der Induktion bedeutet dies, dass eine Änderung des existierenden magnetischen Flusses einen Strom hervorruft, der dann wiederum ein weiteres Magnetfeld bedingt. Die Lenzsche Regel besagt, dass dieses Magnetfeld zwangsläufig immer dem ursprünglichen Magnetfeld (d.h. seiner eigenen Ursache) entgegenwirken muss (vgl. ebd., S. 265). Dies lässt sich am leichtesten im Umkehrschluss argumentieren: Würde es nicht dem ursprünglichen Feld entgegenwirken, gäbe es eine unendliche gegenseitige Verstärkung der Felder, was wiederum unendlich viel Energiezufuhr benötigen und die Energieerhaltung verletzen würde (vgl. ebd.). Aus diesen Überlegungen

ergibt sich somit eine vorgegebene Umlaufrichtung für den induzierten Strom.

James Clerk Maxwell und seine Gleichungen

Aufbauend auf diesen zentralen Forschungsergebnissen von Oersted, Ampère und Faraday sowie vielen weiteren physikalischen Denker:innen im Bereich des Elektromagnetismus formulierte schließlich James Clerk Maxwell seine weltberühmten Gleichungen zur allgemeinen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen magnetischen und elektrischen Feldern. Die erste Version dieser Gleichungen veröffentlichte er 1864 in seinem Werk *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (vgl. Mitolo & Araneo 2019, S. 10; Brandt et al. 2021, S. 1). In ihrer ursprünglichen Darstellung scheinen die Maxwell-Gleichungen stark von der Form abzuweichen, in der sie heute bekannt sind. Zu Beginn formulierte Maxwell nicht vier, sondern stolze zwanzig Gleichungen, um alle ihm relevant erscheinenden Phänomene berücksichtigen zu können. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass im 19. Jahrhundert die heutige Vektorschreibweise noch nicht etabliert war, weswegen alle Raumrichtungen in separaten Gleichungen behandelt werden mussten (vgl. Arthur 2013, S. 62–67). Zudem inkludierte Maxwell Aspekte, die später als implizit gegeben angesehen wurden und daher nicht mehr explizit separat angeführt werden (vgl. ebd.). Im Laufe der Zeit wurden die Gleichungen zunächst durch Maxwell selbst optimiert und mit einer neuen Schreibweise ausgestattet, die unserer heutigen Vektorschreibweise bereits recht ähnlich ist (vgl. ebd.). Eine heute gebräuchliche Form ist eine differenzielle Schreibweise der vier Maxwell-Gleichungen unter Verwendung des elektrischen Vektorfelds \mathbf{E} und des magnetischen Vektorfelds \mathbf{B} . Die Darstellung der Felder mittels Vektoren ermöglicht dabei aufgrund der drei Vektorkomponenten eine Berücksichtigung aller drei Raumrichtungen. Vektorfelder können bezüglich ihrer Rotation **rot** (bzw. Wirbelbildung der Felder) sowie der Divergenz **div** (bzw. Quellen und Senken der Felder) klassifiziert werden. Diese Konzepte werden in den vier Maxwell-

Gleichungen auf elektrische sowie magnetische Vektorfelder angewendet, um diese beschreiben zu können:

$$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot } B = \mu_0 j + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div } E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$\text{div } B = 0, \quad (4)$$

Die ersten beiden Gleichungen zeigen, wie eine Rotation **rot** der jeweiligen Felder zustande kommt. Modellhaft lässt sich das Konzept der Rotation mittels Vektorpfeilen veranschaulichen. Abb. 1a zeigt ein simples rotationsfreies Feld, bei dem die Vektorpfeile alle in dieselbe Richtung zeigen. Ein Beispiel eines rotierenden Feldes wird in Abb. 1b gezeigt.



Abb. 1a: Rotationsfreies Feld

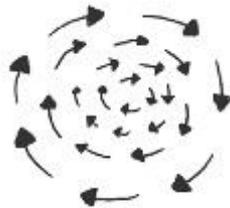


Abb 1b: Feld mit Rotation

An Gleichung (1) erkennt man, dass die Rotation eines elektrischen Feldes immer dann zustande kommt, wenn es ein Magnetfeld gibt, dessen Flussdichte sich im Laufe der Zeit ändert, d.h. die partielle zeitliche Ableitung der magnetischen Flussdichte $\partial B / \partial t$ ungleich Null ist. Rotierende Magnetfelder in Gleichung (2) entstehen dagegen, sobald Ströme fließen (Stromdichte j ist ungleich Null) oder ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld vorhanden ist ($\partial E / \partial t$ ist ungleich Null).

Die Gleichungen (3) und (4) beschreiben dagegen die Divergenz **div** der beiden Felder-Arten. Anschaulich gesagt geht es darum, ob und welche

Quellen die Felder aufweisen. Gleichung (3) zeigt, dass die Quelle bzw. der Ursprung eines elektrischen Feldes immer einer Ladungsdichte ρ entspricht. Elektrische Felder entstehen demnach immer zwischen (gleichnamigen und ungleichnamigen) elektrischen Ladungen; die Möglichkeit der aktiven, räumlichen Trennung von elektrischen Ladungen ist daher essentiell für die Erzeugung eines elektrischen Feldes. Zur grafischen Veranschaulichung werden in diesem Kontext häufig Feldlinien mit Richtungspfeilen gewählt. Die Feldliniendichte ist dabei proportional zur Stärke des Feldes an den verschiedenen Orten im Raum (vgl. Eichler 2014, S. 190). Ein simples Beispiel zweier entgegengesetzter Ladungen und des elektrischen Feldes, das sie hervorrufen, zeigt Abbildung 2. Es ist erkennbar, dass die elektrischen Feldlinien stets

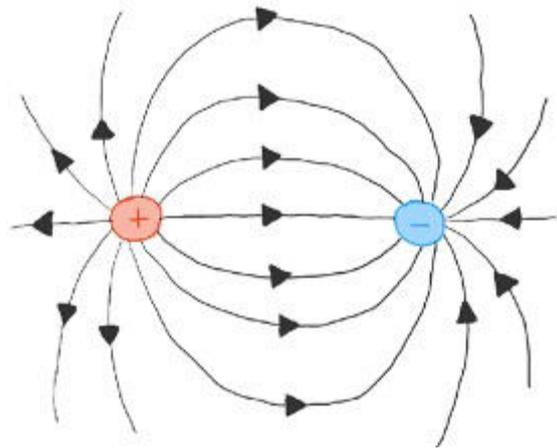


Abb. 2: Elektrisches Feld zwischen einer positiven und einer negativen Punktladung.

von der positiven zur negativen Ladung führen (vgl. ebd.). Man spricht hier von offenen Feldlinien.

Im Gegensatz dazu beschreibt Gleichung (4), dass die Divergenz magnetischer Felder gleich Null ist. Konkret bedeutet dies, dass magnetische Felder anders beschaffen sind; im Gegensatz zu elektrischen Ladungen können magnetische Pole nicht voneinander getrennt werden. Die magnetischen Feldlinien werden daher als geschlossene Feldlinien bezeichnet. Für einen Stabmagneten ist dies in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die Feldlinien nicht nur außerhalb des Magneten auftreten, sondern auch innerhalb

des Magneten weiterlaufen, sodass stets geschlossene Linien zu verzeichnen sind. Per Definition ist die Richtung der Feldlinien außerhalb des Magneten von Nord nach Süd festgelegt (vgl. ebd., S. 202). Die Eigenschaft der geschlossenen Feldlinien ist nicht nur ein wichtiger Schritt für die Theoriebildung, sondern hat ganz konkrete praktische Auswirkungen. Ein banales Beispiel wäre etwa, was beim Auseinanderbrechen eines Magneten passiert. Laut Gleichung (4) wissen wir, dass wir Nord- und Südpol eines Magneten niemals trennen können. Was wir in der Praxis erhalten, sind zwei kleinere Magnete, die ebenfalls wieder jeder für sich über einen Nordpol und einen Südpol verfügen.

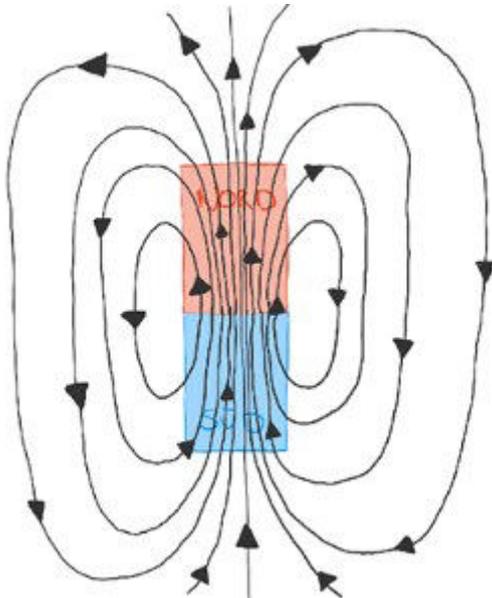


Abb. 3: Magnetisches Feld eines Stabmagneten.

Mit seinen Gleichungen baute Maxwell somit eine bislang stabile Brücke zwischen elektrischen und magnetischen Feldern sowie zwischen praktischen Erkenntnissen und theoretischen Beschreibungen von physikalischen Phänomenen in diesem Bereich. Zusammenfassend zeigt sich einerseits mittels Gleichung (3), dass statische elektrische Felder durch ruhende elektrische Ladungen hervorgerufen werden (vgl. Eichler 2014, S. 201). Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Gleichung (2) folgt andererseits, dass gleichmäßig bewegte elektrische Ladungen elektrische sowie magnetische Felder erzeugen (vgl. ebd.). Darüber hinaus schuf Maxwell mit seinen Gleichungen die Grundlage zur Beschreibung von elektromagnetischen

Feldern, die sich im Raum wellenartig ausbreiten. Diese sind heute als elektromagnetische Wellen bekannt und werden durch beschleunigte elektrische Ladungen erzeugt (vgl. ebd., S. 223). Experimentell wurde dieses Phänomen im Jahre 1888 von Heinrich Hertz nachgewiesen (vgl. Petrascheck & Schwabl 2023, S. XVI). Durch Maxwells Beiträge zur Beschreibung des Elektromagnetismus und speziell der elektromagnetischen Wellen war der Physiker maßgeblich an der Erarbeitung grundlegender Prinzipien beteiligt, die heutzutage aus vielen alltäglich eingesetzten technischen Geräten nicht mehr wegzudenken sind – angefangen mit der Übertragung von Radiosignalen bis hin zur medizinischen Untersuchung mittels Röntgenstrahlung sind elektromagnetische Wellen ein zentraler Bestandteil unseres Alltags geworden. Nicht zuletzt zeigt die mathematische Beschreibung elektromagnetischer Wellen auch auf, weshalb sichtbares Licht sich überhaupt weit genug ausbreiten kann, um von uns Menschen wahrgenommen zu werden. Wird eine elektromagnetische Welle betrachtet, welche von gleichmäßig beschleunigten Ladungen hervorgerufen wird, so muss auch die Gesamtenergie der sich ausbreitenden Welle pro Zeit- und Flächeneinheit gleichbleiben. Da die Ausbreitung der Welle kugelförmig erfolgt und daher die Flächenzunahme mit zunehmendem Abstand proportional zu r^2 ist, muss die Intensität der Welle umgekehrt mit zunehmendem Abstand r von der Quelle proportional zu $1/r^2$ abnehmen. Die Intensität der elektromagnetischen Welle wäre damit mathematisch gesehen erst bei Werten nahe dem Unendlichen näherungsweise Null. Dieser Zusammenhang kann somit herangezogen werden, um zu beschreiben, warum selbst Licht aus anderen Galaxien die Erde erreichen und vom menschlichen Auge wahrgenommen werden kann.

Von Maxwell zu Einstein und der relativistischen Physik

Weniger bekannt, aber nicht weniger bedeutend ist zudem die Tatsache, dass nicht zuletzt die Maxwell-Gleichungen auch einen wesentlichen Denkstoß für die spätere Entwicklung der Relativitätstheorie lieferten. Maxwell war zunächst davon aus-

gegangen, dass seine Gleichungen nur in bestimmten Bezugssystemen – konkret: in bestimmten Inertialsystemen – Gültigkeit haben konnten (vgl. Fließbach 2012, S. 8). Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, das relativ zu einem betrachteten Ereignis entweder in Ruhe oder gleichförmig – das heißt, unbeschleunigt – bewegt ist. Maxwell selbst glaubte, dass seine Gleichungen wiederum nur in bestimmten Inertialsystemen gültig sein konnten, nämlich in jenen, die zum Ausbreitungsmedium der elektromagnetischen Wellen in Ruhe waren. Diese Annahme wurde später unter anderem durch das Michelson-Morley-Experiment von 1885 widerlegt, wo sich zeigte, dass eine Änderung des Inertialsystems, von welchem aus man die Wellen beobachtet, nichts an der Gültigkeit der Maxwell-Gleichungen ändert (vgl. ebd.). Dies ist aus heutiger Sicht nicht zuletzt deswegen schlüssig, weil inzwischen bekannt ist, dass elektromagnetische Wellen an kein Ausbreitungsmedium gebunden sind (vgl. Tipler 2019, S. 1139).

Nachdem von Michelson und Morley experimentell gezeigt worden war, dass es kein ausgezeichnetes Inertialsystem gibt, sondern die Maxwell-Gleichungen in allen Inertialsystemen gültig sind, suchte Einstein nach einer Möglichkeit, dies auch mathematisch abbilden zu können (vgl. Fließbach 2012, S. 8). Die bis dato verwendete Formel zum Wechsel von Bezugssystemen, welche intuitiv der Addition von Relativgeschwindigkeiten entsprach, konnte im Fall der Maxwell-Gleichungen jedoch nicht angewendet werden, da hierbei in bestimmten Situationen mathematisch Überlichtgeschwindigkeiten auftauchen würden. Daher führte Einstein, wie in seiner Abhandlung *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* von 1905 beschrieben, eine neue Herangehensweise zum Wechsel des Bezugssystems ein, der die allgemeine Gültigkeit der Maxwell-Gleichungen in allen Inertialsystemen zugrunde gelegt wird. Dies ist heutzutage als Einsteinsches Relativitätsprinzip im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie bekannt (vgl. Einstein 1905, S. 891; Fließbach 2012, S. 8–9). Bei Anwendung dieser neuen Herangehensweise zum Wechsel von Bezugssystemen zeigt sich, dass sich für kleine Geschwindigkeiten wiederum näherungsweise die ursprünglich verwendeten Formeln ergeben (vgl. Fließbach 2012, S. 8–15). Gesamt-

haft betrachtet lässt sich somit die damals vorherrschende klassische, nicht-relativistische physikalische Beschreibung als Sonderfall der allgemeinen relativistischen Beschreibung der Welt verstehen.

Fazit

Wie die obige Abhandlung zeigt, sind die Maxwell-Gleichungen eine wichtige Errungenschaft der Physik, die in verschiedene Richtungen als Brücke fungiert. Zunächst verbinden sie die ersten Experimente und Theorien zum Zusammenhang von Elektrizität und Magnetismus, von Oersted über Ampère bis zu Faraday, indem sie den notwendigen Formalismus zur Verfügung stellen. Damit bilden sie zugleich eine mathematische Brücke zwischen Theorie und Praxis. Weiters waren sie der Grundstock für viele bahnbrechende wissenschaftliche Erkenntnisse. So können sie nicht zuletzt als Brücke von der nicht-relativistischen zur relativistischen Betrachtung von Ereignissen in der Physik angesehen werden.

Literaturverzeichnis

Albert Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: *Annalen der Physik*, Volume 17, 1905, S. 891–921. <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>

Christine Blondel und Abdelmadjid Benseghir: The key role of Oersted's and Ampère's 1820 electromagnetic experiments in the construction of the concept of electric current. In: *Am. J. Phys.*, Volume 85, 2017, S. 369–380. <https://doi.org/10.1119/1.4973423>

Dietmar Petrascheck und Franz Schwabl: *Elektrodynamik*. 4. Aufl. Berlin: Springer Spektrum 2023.

James R. Hofmann: Ampere, Electrodynamics, and Experimental Evidence. In: *Osiris*, Volume 3, 1987, S. 45–76. <https://doi.org/10.1086/368661>

John W. Arthur: The Evolution of Maxwell's Equations from 1862 to the Present Day. In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Volume 55, Issue 3, 2013, S. 61–81. <https://doi.org/10.1109/MAP.2013.6586627>

Jürgen Eichler: Physik für das Ingenieurstudium. Prägnant mit vielen Kontrollfragen und Beispielaufgaben. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.

Jürgen Wagner: Erste Schritte in die Theoretische Physik. Verständlich erklärt vom Abiturniveau aus. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2022.

Klaus Lüders und Robert Otto Pohl: Pohls Einführung in die Physik. Band 2: Elektrizitätslehre und Optik. 24. Aufl. Berlin: Springer Spektrum 2018.

Marlene Marinescu: Elektrische und magnetische Felder. Eine praxisorientierte Einführung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2009.

Massimo Mitolo und Rodolfo Araneo: A Brief History of Electromagnetism. In: IEEE Industry Applications Magazine, Volume 25, Issue 2, 2019, S. 7–11. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2018.2884753>

Paul A. Tipler und Gene Mosca: Physik für Studierende der Naturwissenschaften und Technik. Hg. v. Peter Kersten und Jenny Wagner. 8. Aufl. Berlin: Springer Spektrum 2019.

Siegmund Brandt, Hand Dieter Dahmen, Claus Grupen und Tilo Stroh: Elektrodynamik. Von den Maxwell-Gleichungen über die Elektro- und Magnetostatik zur elektromagnetischen Induktion. Berlin: Springer Spektrum 2021.

Stefan Roth und Achim Stahl: Elektrizität und Magnetismus. Experimentalphysik – anschaulich erklärt. Berlin: Springer Spektrum 2018.

Thorsten Fließbach: Allgemeine Relativitätstheorie. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2012.

Wolfgang W. Osterhage: Eine Rundreise durch die Physik. Ein kompakter Überblick von der Kinematik zum Quantencomputer. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2024.

LAURA GRABHER-MEYER absolviert im Anschluss an ihr Bachelorstudium im Bereich Lehramt für die Sekundarstufe mit den Unterrichtsfächern Englisch und Physik derzeit das gleichnamige Masterstudium an der Universität Innsbruck. Im Studienfach Englisch beschäftigt sie sich im Bereich der Fachwissenschaften u.a. mit literaturwissenschaftlichen Aspekten. Sie ist seit 2024 PRO SCIENTIA Stipendiatin.