

Stars der Physik: James Clerk Maxwell

ELEKTROMAGNETISMUS Er war der Physiker und Mathematiker mit dem wohl größten Einfluss auf das 20. Jahrhundert und blieb doch vielen Zeitgenossen weitestgehend unbekannt.

Maria Lutz,
freie Fachautorin, Augsburg

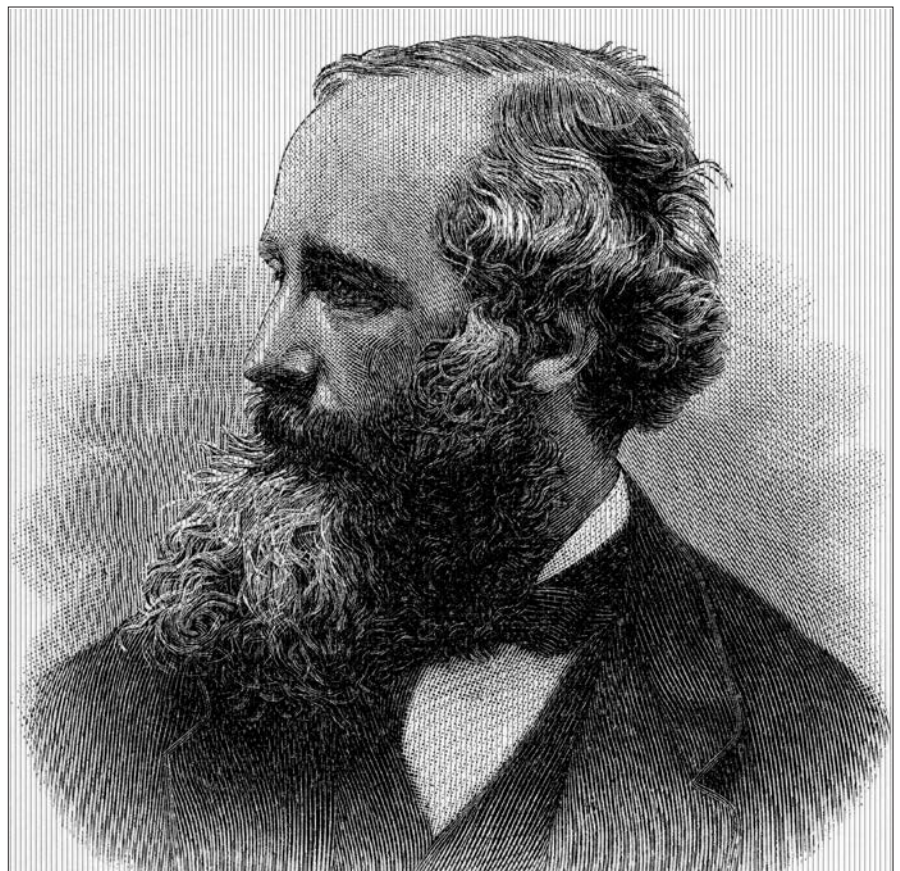
Am 13. Juni 1831 wurde *James Clerk* (Bild 1) als einziges Kind des Rechtsanwalts *John Clerk Maxwell* und dessen Frau in Edinburgh geboren. Schnell stand fest: hier wächst ein neugieriges und kluges Kind heran. Seine Eigenschaft, simple Dinge zu hinterfragen und dessen Funktionsweise zu verstehen, zeigte sich bereits im Alter von 14 Jahren.

Erste Schritte

Über das Prinzip mit zwei Stiften und einer Schnur einen Kreis zu zeichnen, schrieb *Maxwell* einen wissenschaftlichen Artikel mit dem Namen »*A new Method of mechanically plotting mathematical curves using a piece of a twing*« oder auch einfach ausgedrückt »*Wie man mit einer Schnur mathematische Kurven zeichnen kann*«. Mit einer Schnur, die an zwei Punkten, den Brennpunkten, befestigt war, zeichnete er Ellipsen mit verschiedenen Abständen der Punkte und Schnurlängen. Auch Kurven mit mehr als zwei Brennpunkten behandelte der junge *Maxwell*. Den größten Einfluss hatte diese Arbeit dabei wohl auf ihn selbst. Denn obwohl diese Ideen in den Grundzügen schon bekannt waren, war es erstaunlich und faszinierend, dass ein 14-Jähriger diese konzipierte [1]. Dies war der Startschuss für seine naturwissenschaftliche Karriere, in der er seine Faszination über Geometrie und mechanischen Modellen behielt.

Schon mit Mitte Zwanzig ein Lehrstuhl

Mit 23 Jahren erhielt er seinen Abschluss in Cambridge und wurde zwei Jahre später auf den Lehrstuhl für Physik in Aberdeen berufen. In den ersten Jahren forschte er für seine Teilnahme an einem renommierten wissenschaftlichen Wettbewerb an dem Thema »*Die Bewegung von Saturns Ringen*«. *Maxwell*



Quelle: orion_eff@stock.adobe.com

→ Bild 1: James Clerk Maxwell – ein fast schon verkanntes Genie der Physik

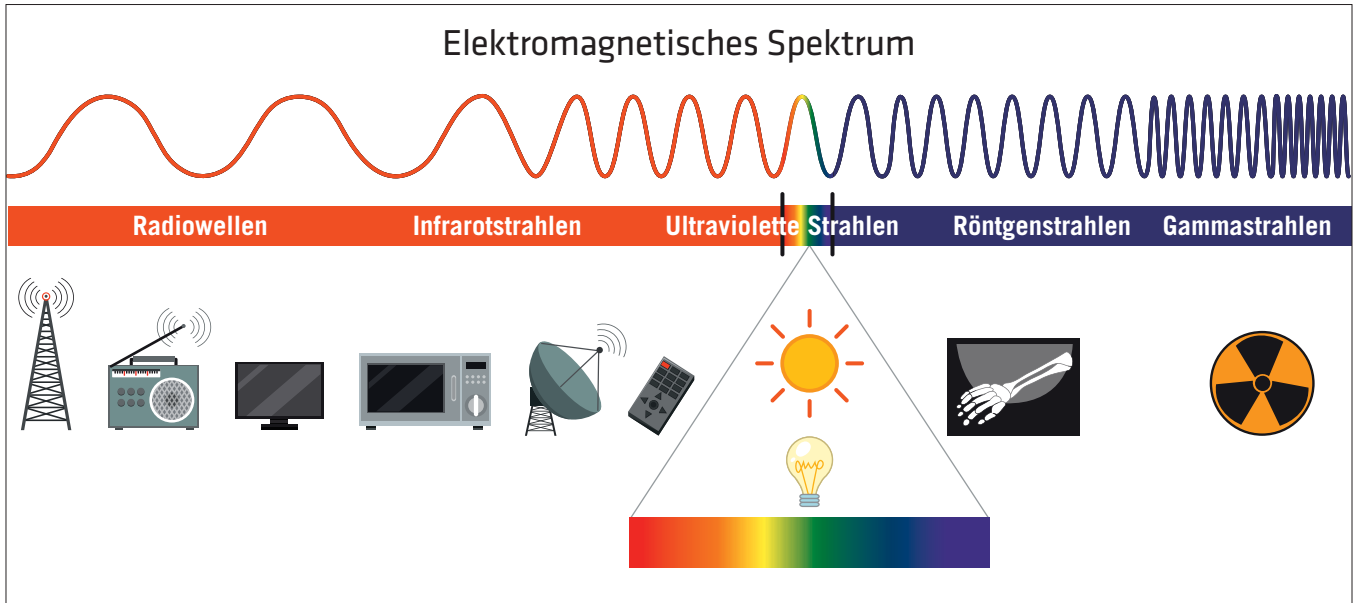
nannte als Grund für die Stabilität der Ringe deren Zusammensetzung aus einer Unmenge an kleinen Teilchen, wobei sich jedes Teilchen wie ein kleiner Satellit verhält, der den Planeten umkreist. Seine Erkenntnisse gingen noch weiter und er sagte das Verschwinden der Ringe aufgrund von Saturns Schwerkraft voraus. Alle seine Aussagen, die er 1857 traf, konnten erst in den 1980 Jahren von den Raumsonden *Voyager 1* und *2* verifiziert werden [2].

Bereits 1860 – also im Alter von nur 29 Jahren – wechselte er als Professor an das *King's College* und präsentierte ein Jahr später das erste Farbfoto der Welt. Damals eine Nebensächlichkeit zu Erkenntnis hinter diesem Foto.

Maxwell begründete die additive Farbtheorie. Mit Hilfe eines Fotografen wurde eine Schleife mit Karomuster mit rotem, blauem und grünem Filter abfotografiert. Mit drei Projektoren wurden die Einzelbilder übereinander projiziert und das erste Farbfoto der Welt war zu sehen. Dies war der Beweis für die Zusammensetzung aller Farben aus den Primärfarben rot, blau und grün, im Gegensatz dazu ergibt die Mischung von rot, blau und grüner Farbe einen braunen Farbton [3].

Wellen verändern die Welt

Seine wissenschaftliche Arbeit aber, die er 1864 veröffentlichte, sollte die Physik im 20.



Quelle: b7gffx@stock.adobe.com

→ Bild 2: Sichtbares Licht ist nur ein »schmäler« Bereich des gesamten uns bekannten Spektrums elektromagnetischer Wellen

Jahrhundert vollständig verändern. Die Rede ist von elektromagnetischen Wellen (Bild 2). Maxwell zeigte, dass Magnetismus, Elektrizität und Licht direkt zusammenhängen und formulierte eine einheitliche Theorie mit nur vier Gleichungen. Dadurch wurde Elektrizität und Magnetismus eine messbare Kraft.

Alle Erkenntnisse konnte er aus der bloßen Beobachtung der gegenseitigen Einflüsse von Strom und Magneten gewinnen. Der Nachweis von Elektronen, mit denen wir heute Elektrizität als Elektronenbewegung, Magnetismus als Elektronenrotation und Licht als Abgabe von Photonen definieren, gelang erst 30 Jahre später. Elektrische und magnetische Kräfte ergänzen sich und die Felder bewegen sich in Form von elektromagnetischen Wellen mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum. Da nichts so schnell sein

kann wie Licht, folgerte Maxwell, dass Licht eine elektromagnetische Welle sein muss.

Seine folgenden vier Gleichungen sehen auf den ersten Blick unverständlich und kompliziert aus, doch die Kernaussagen – der Zusammenhang zwischen der zeitlichen und der räumlichen Änderung der elektromagnetischen Felder – sind uns allen bekannt und gelten als selbstverständlich [4]:

$$\text{rot } E = - \frac{dB}{dt}$$

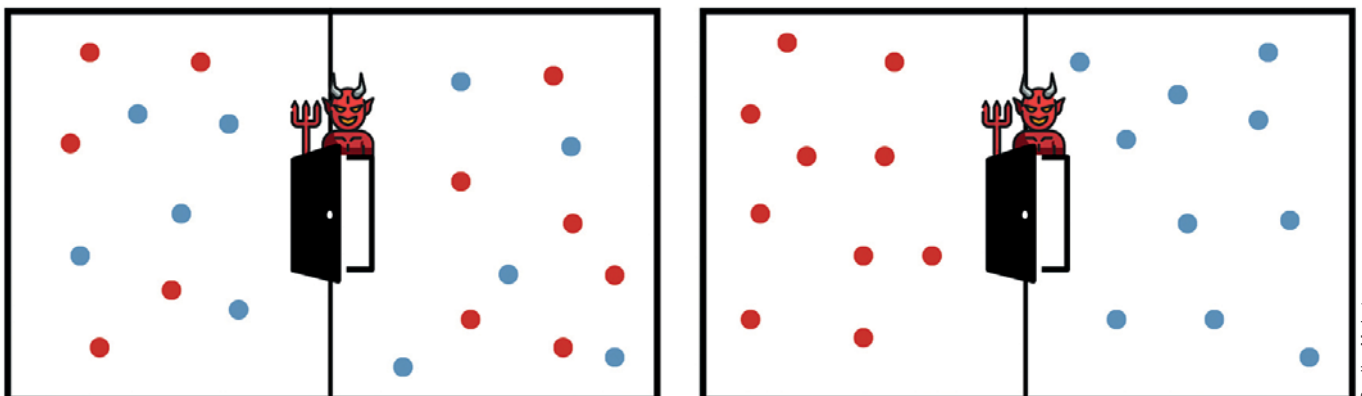
Wird ein Magnetfeld B zeitlich geändert, dann wird ein elektrisches Feld E erzeugt. Dieses Prinzip ist das eines Fahrraddynamos:

$$\text{rot } B = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{dE}{dt} + \frac{j}{c^2 \cdot \epsilon_0}$$

Magnetfelder können durch sich zeitliche ändernde elektrische Felder oder durch elektrische Ströme entstehen. Aus den zwei ersten Formeln lässt sich erkennen: ein sich änderndes elektrisches Feld erzeugt ein Magnetfeld. Wenn das Magnetfeld erzeugt wird, ändert es sich und daraus wird wieder ein elektrisches Feld. Und dies ist dann eine elektromagnetische Welle.

$$\text{div } E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Die dritte Formel besagt: Elektrische Felder können nur an Ladungen beginnen oder enden. Die Divergenz »div« ist die Quellstärke des elektrischen Feldes, dabei ist die Quelle die Ladung, an der das Feld beginnt. ρ misst die Stärke der Ladung und ϵ_0 ist die allseits bekannte Dielektrizitätskonstante:



Quelle: M. Lutz

→ Bild 3: Prinzip des Maxwellschen Dämons

div $B = 0$

Bei magnetischen Feldern gibt es keine Ladungen und somit ist die Quellstärke null.

In einem Aspekt irrte sich *Maxwell* jedoch. Er ging davon aus, dass elektromagnetische Wellen ein Medium benötigen, in dem sie sich ausbreiten können, genauso wie Wellen auf dem Wasser oder Schallwellen. Dieses Medium, auch »Lichtäther« genannt, konnte *James Maxwell* selbst nicht begreifen und verstehen, sodass er es für seine Experimente zunächst außer Acht ließ. Diese Entscheidung war wohl goldrichtig, denn heute wissen wir, dass elektromagnetische Wellen sich auch im Vakuum ausbreiten können.

Leider konnten diese genialen, aber doch abstrakten Gleichungen nicht direkt erfasst werden. Erst nachdem *Heinrich Hertz* elektromagnetische Wellen erzeugte und das gleiche Verhalten wie Licht bewies, konnte er die Gleichungen von *Maxwell* richtig nutzbar machen. Neben Licht gibt es im elektromagnetischen Spektrum noch viele weitere Wellen, die wir täglich nutzen. Radiowellen, Mikrowellen, Röntgen- oder Infrarotwellen (**Bild 2**). Maxwells Erkenntnisse liefern die Grundlage von Radio, TV, Funktechnik und nicht zuletzt für *Albert Einsteins* Theorien und der Quantenmechanik. *Albert Einstein* sagte: »*Ich stehe auf den Schultern von Maxwell und nicht von Newton.*« [5]

Brückenbauer zwischen Mathematik und Physik

Neben seinen Forschungen zu elektromagnetischen Wellen faszinierte ihn die statistische Beschreibung von Molekülen in Gasen. Das Ergebnis kennt man heute unter der Maxwell-Boltzmann-Verteilung, die die Ge-

schwindigkeitsverteilung von Teilchen in idealen Gasen beschreibt. Während dieser Studien setzte er ein Gedankenexperiment in die Welt, welches das zweite thermodynamische Gesetz in Frage stellt und die Wissenschaft über 100 Jahre lang beschäftigte. Es trägt den Namen *Maxwellscher Dämon* und wird wie folgt beschrieben (**Bild 3**): Man stelle sich einen Behälter vor, der durch eine Trennwand mit einer Tür darin in zwei Bereiche getrennt ist. An dieser Tür sitzt ein fiktiver Dämon, der die Tür auf und zu macht. In den Behältern ist ein Gas im Gleichgewicht, das heißt überall herrscht die gleiche Temperatur. Schnelle Moleküle lässt der Dämon vom rechten in den linken Behälter und langsame Moleküle von den linken in den rechten Behälter passieren. Die linke Seite erwärmt sich, während sich die rechte Seite abkühlt.

Dabei wird der Anfangszustand als maximale Entropie beschrieben. Entropie ist ein statistisches Phänomen und beschreibt in der Thermodynamik, wie sehr ein System vom thermischen Gleichgewicht entfernt ist. Der Endzustand mit dem warmen und kalten Behälter besitzt dagegen geringe Entropie. Dass die Entropie des Systems aus Behälter und Dämon ohne einen Austausch mit der Umwelt geringer wird, ist genau der Punkt, der sich mit dem zweiten thermodynamischen Gesetz nicht vereinbaren ließ.

Erst 100 Jahre später konnte dieses Rätsel gelöst werden. Der Dämon merkt sich die Zustände des Behälters und die Eigenschaften der Moleküle. Er speichert in seinem Gedächtnis also Informationen. Dieser Gedächtnisspeicher ist endlich und muss zu einem bestimmten Zeitpunkt gelöscht werden, dadurch sinkt die Entropie des Dämons und die freigegebene Entropie wird dem System wieder zugeführt. Dass das Löschen von Information in Form von Bits Entropie frei-

setzt, nennt sich »Landauer-Prinzip«. Durch dieses Gedankenexperiment und dem Landauer-Prinzip wird eine Verbindung zwischen Entropie und Information geschaffen. Daraus definierte Shannon seine eigene Entropie, die bereits aus dem Artikel über Claude Shannon bekannt ist [6] (»ema« 9.2020, S. 22-23).

Obwohl *James Clerk Maxwell* mit seinen fundamentalen Beiträgen in der Physik auf einer Stufe mit *Sir Isaac Newton* und *Albert Einstein* gestellt wird, ist sein Name von den Dreien wohl am unbekanntesten. Dies hat mehrere Gründe, zum einen gab es noch kein Verständnis von Elektromagnetismus auf atomarer Ebene und seine Ideen und Erkenntnisse waren sehr abstrakt. Während jeder bei Newton den Apfel vom Baum fallen sieht, sind Wellen, die aus magnetischen und elektrischen Feldern entstehen, ein wenig schwerer vorstellbar. Maxwell wurde nur 48 Jahre alt. Er starb am 5. November 1879 in Cambridge an Magenkrebs.

Literatur

- [1] <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Projects/Johnson/chapter-4/>
- [2] <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/science/saturn/>
- [3] https://www.deutschlandfunk.de/schottisches-karomuster-als-sensation.871.de.html?dram:article_id=127336
- [4] <https://scienceblogs.de/hier-wohnen-drauchen/2010/08/24/die-maxwellgleichungen-ohne-formeln-1-felder/>
- [5] <https://www.theguardian.com/science/2015/dec/08/einstein-inspired-by-james-clerk-maxwell>
- [6] <https://www.youtube.com/watch?v=KR23aMjIHlY&t=498s>

Das kurze Leben von James Clerk Maxwell

Maxwells Erziehung, die auch das Bibelstudium umfasste, wurde ihm durch seine christliche Mutter zuteil. Seine frühe Jugend verbrachte er zumeist auf dem Familiensitz Glenlair bei Dumfries (Schottland). Maxwells Mutter starb, als er erst acht Jahre alt war. Später ging Maxwell zur Edinburgh Academy. Sein Spitzname in der Schule war »Dafty« (Dussel oder Sonderling). Er bekam ihn, weil er am ersten Schultag selbstgemachte Schuhe trug. Ganz und gar nicht schusselig waren seine ersten Arbeiten, die er – wie schon im Beitrag erwähnt – im Alter von nur 14 Jahren schrieb. Mit 16 Jahren schrieb sich Maxwell an der Universität Edinburgh ein und studierte Naturphilosophie, Moralphilosophie und mentale Philosophie. Nur drei Jahre später wechselte Maxwell zur Universität Cambridge. Dort schloss er sein Studium mit der zweitbesten Mathematikprüfung seines Jahrgangs ab. 1856 wurde Maxwell auf den Lehrstuhl für Naturphilosophie am

Marischal College in Aberdeen berufen, den er bis zur Zusammenlegung mit dem King's College im Jahre 1860 innehatte.

1858 heiratete er Katherine Mary Dewar, Tochter des Prinzipals des Marischal College in Aberdeen. 1871 wurde er zum ersten »Cavendish Professor of Physics nach Cambridge« berufen und wiederum drei Jahre später in die »American Academy of Arts and Sciences« gewählt (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell). Eines seiner bekanntesten Zitate sei noch erwähnt: »*Welche Schwierigkeiten wir auch haben, um eine konsistente Vorstellung der Beschaffenheit des Äthers zu entwickeln: Es kann keinen Zweifel geben, dass der interplanetarische und interstellare Raum nicht leer ist, sondern dass beide von einer materiellen Substanz erfüllt sind, die gewiss die umfangreichste und vermutlich einheitlichste Materie ist, von der wir wissen.*« (Quelle: <https://beruhmte-zitate.de/>)