

**OSTWALDS KLASSIKER  
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN  
Band 69**

---

Reprint der Bände 69 und 102

---

Über Faradays Kraftlinien

.

Über physikalische Kraftlinien

von  
**James Clerk Maxwell**

---

Verlag Harri Deutsch

OSTWALDS KLASSIKER  
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN.  
Band 69



James Clerk Maxwell  
13.6.1831–5.11.1879

OSTWALDS KLASSIKER  
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN

Band 69

Reprint der Bände 69 und 102

Über Faradays Kraftlinien

(1855/1856) - Band 69

Über physikalische Kraftlinien

(1861/1862) - Band 102

von

James Clerk Maxwell

Herausgegeben von  
Ludwig Boltzmann

Eingeleitet von  
Holger T. Grubn



Verlag Harri Deutsch

Der Autor der Einleitung dieses Bandes  
Prof. Dr. Holger T. Grahn  
Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlin

*Bibliografische Informationen Der Deutschen Nationalbibliothek*

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

**ISBN 978-3-8171-3424-3**

Jede Vervielfältigung außerhalb des Rahmens des Urheberrechtsgranzes ist ohne  
Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für  
Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Fernübertra-  
gung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Auto-  
ren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und  
Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

© Wissenschaftlicher Verlag Harig-Deutsch GmbH,

Frankfurt am Main, 2009

4., erste Auflage 2009

Druck: Korsch-Bach Druckerei GmbH, Schallk

Printed in Germany

# Inhalt

Einführung von H. T. Grath ..... 1X

## Ueber Faraday's Kraftlinien.

### I. Theil. Anwendung auf statische Zustände und stationäre Stromung.

A. Einleitung	3
B. Theorie der Bewegung einer unzusammendrückbaren Flüssigkeit (Art. 1-9)	9
C. Theorie der gleichförmigen Bewegung einer unwägbaren [massenlosen] unzusammendrückbaren Flüssigkeit durch ein widerstehendes Mittel (Art. 10-33)	14
D. Anwendung der Vorstellung der Kraftlinien [besser Inductionslinien]	24
E. Theorie der Dielektrica	34
F. Theorie der permanenten Magnete	37
G. Theorie der paramagnetischen und diamagnetischen Induction	39
H. Theorie der magnokrySTALLischen Induction	55
I. Theorie der Leitung der galvanischen Elektricität	35
K. Ueber die elektromotorischen Kräfte	36
L. Ueber die Fortwirkung geschlossener Ströme	39
M. Ueber die durch Inductionswirkung hervorgerufenen elektrischen Ströme	42

### II. Theil. Ueber Faraday's elektrotonischen Zustand.

A. Einleitung	46
B. Ueber die Quantität und Intensität des elektrischen Stromes	47
C. Magnetische Quantität und Intensität	51
D. Elektromagnetismus (Theorem I-VII)	52
E. Zusammenfassung des über die Theorie des elektrotonischen Zustandes Gesagten	66

## III. Theil. Beispiele.

A. Theorie der elektrischen Bilder	71
B. Ueber das Verhalten einer paramagnetischen oder diamagnetischen Kugel in einem homogenen magnetischen Felde	75
C. Magnetisches Feld von veränderlicher Intensität	77
D. Zwei Kugeln in einem homogenen Felde	79
E. Zwei Kugeln zwischen den Polen eines Elektromagnets	80
F. Ueber das magnetische Verhalten einer Kugel, welche aus einer Substanz geschnitten ist, deren Widerstandscoefficient in verschiedenen Richtungen verschieden ist	81
G. Permanenter Magnetismus in einer Kugelschale	84
H. Elektromagnetische Wirkung einer Kugelschale	85
I. Wirkung des Eisenkerns des Elektromagnets	86
K. Elektrostatische Functionen in einem kugelförmigen Elektromagnet	87
L. Inductionsapparat, dessen primäre und secundäre Spule auf ein und dieselbe Kugeloberfläche aufgewunden sind	89
M. Eine leitende Kugelschale rotirt in einem Magnetfelde	92
Anmerkungen	97

## Ueber physikalische Kraftlinien.

<b>1. Theil. Anwendung der Theorie der Molekularwirbel auf die Erscheinungen des Magnetismus.</b>	
Einleitung	3
Satz I	6
Satz II	11
Satz III	12
<b>2. Theil. Anwendung der Theorie der Molekularwirbel auf elektrische Ströme.</b>	
Einleitung	23
Satz IV	26
Satz V	27
Satz VI	30
Satz VII	33
Satz VIII	34
Satz IX	40
Satz X	41
Satz XI	43
<b>3. Theil. Anwendung der Theorie der Molekularwirbel auf die statische Elektrizität.</b>	
Einleitung	53
Satz XII	58
Satz XIII	61
Satz XIV	62
Satz XV	63
Satz XVI	66
Satz XVII	67
<b>4. Theil. Anwendung der Theorie der Molekularwirbel auf die Wirkung des Magnetismus auf polarisirtes Licht.</b>	
Einleitung	70
Satz XVIII	73
Satz XIX	81
Anmerkungen	88



## Einleitung

### James Clerk Maxwell: Kraftlinien

VON

Holger T. Grahn

James Clerk Maxwells wissenschaftliche Arbeiten zeigen, dass er in der Betrachtung der Wahrheit viel mehr Freude fand als in der Anerkennung, etwas entdeckt zu haben. Sir William Davidson Niven, der Herausgeber von Maxwells wissenschaftlichen Veröffentlichungen, sagte über Maxwells wissenschaftliche Arbeiten: „Sollten haben sich die geistigen Fähigkeiten in Bezug auf Erfindungen und Erklärungen, die Zuneigung zu den Naturwissenschaften und das Vermögen etwas mathematisch zu entwickeln in einer Person in demselben Umfang vereint. Es braucht aber auch nahezu vergleichbare Leistungen mit denen von Maxwell selbst, um die etwas schwierigeren Bestandteile seiner Arbeiten, die aus diesem Zusammenspiel hervorgehen, zu beschreiben, da jede mit dem geschickten, aber unverkennbaren Abdruck eines Genies geprägt ist.“<sup>1</sup> Maxwell hat sich in seiner wissenschaftlichen Laufbahn, neben den hier in Übersetzung von Ludwig Boltzmann vorliegenden Arbeiten *Über Faradays Kraftlinien* und *Über physikalische Kraftlinien*, hauptsächlich mit Experimenten zur Farbwahrnehmung, mit optischen Themen, mit Untersuchungen über elastische Körper, mit reiner Geometrie, mit Mechanik, mit den Ringen des Saturns sowie mit der Molekularphysik beschäftigt. Am bekanntesten ist er natürlich durch seine Theorie des elektromagnetischen Feldes einschließlich der elektromagnetischen Theorie des Lichtes geworden.

<sup>1</sup> Lewis Campbell und William Garnett: *The Life of James Clerk Maxwell* (MacMillan and Co., London, 1882), S. 465.

## James Clerk Maxwell: ein außergewöhnlicher Wissenschaftler

James Clerk Maxwell wurde am 13. Juni 1831 in Edinburgh, Schottland, geboren und verbrachte seine Kindheit auf dem Familiensitz Glenlair der Maxwells in der Nähe des Dorfes Coorsock im schottischen Verwaltungsgebiet von Dumfries and Galloway. Im Jahre 1841 wurde Maxwell von seinem Vater auf die Edinburgh Academy, einer unabhängigen, im Jahre 1824 gegründeten Schule, gestrichelt. In diese Zeit fällt seine ersten wissenschaftlichen Arbeiten. Im Alter von 14 Jahren schrieb er eine Abhandlung über die mechanischen Mittel, mathematische Kurven mit einem Faden zu zeichnen, sowie über die Eigenschaften von Ellipsen und Kurven mit mehr als zwei Brennpunkten. Seine Arbeit unter dem Titel *Über die Beschreibung solcher Kurven und solcher, die eine Vielzahl von Brennpunkten besitzen* wurde im Frühjahr 1846 vor der Königlichen Gesellschaft von Edinburgh von James Forbes, Professor der Naturphilosophie an der Universität Edinburgh, vorgelesen, da Maxwell selbst noch zu jung war. Nach sechs Jahren verließ er die Akademie und begann im Alter von 16 Jahren an der Universität in Edinburgh Vorlesungen zu hören. In dieser Zeit beschäftigte er sich hauptsächlich mit den Eigenschaften von polarisiertem Licht, dem Stereoskop, dem Galvanismus, der Theorie von Rollkurven sowie dem Gleichgewicht elastischer Festkörper. Zu den letzten beiden Themen wurden im Februar 1849 bzw. Frühjahr 1850 zwei Arbeiten der Königlichen Gesellschaft von Edinburgh vorgestellt, aber wiederum nicht von Maxwell selbst, sondern von Philip Kelland, Professor für Mathematik an der Universität Edinburgh, da es für einen Jungen in einer runden Jacke (*boy in a round jacket*)<sup>2</sup> nicht angemessen war; das

<sup>2</sup> In der Mitte des 19. Jahrhunderts war es Mode, dass Jungen mit immer Art Militaryjacket, die als *round jacket* bezeichnet wurde, bekleidet waren.

Podium zu betreten. Seine freie Zeit verbrachte Maxwell zu Hause in Glenlair, wo er auch Experimente durchführen konnte.

Im Oktober 1850 wechselte Maxwell an die Universität Cambridge nach England. Dort studierte er unter anderem bei William Hopkins, dessen Spitzname *senior wrangler-maker* war. Ein *wrangler* ist ein Mathematikstudent der Universität Cambridge, der das dritte Studienjahr in allen drei mathematischen Gebieten mit Auszeichnung besteht. Im Jahre 1854 schloss Maxwell sein Studium der Mathematik am Trinity College der Universität Cambridge mit der zweitbesten Mathematikprüfung (*second wrangler*) seines Jahrgangs ab. Allerdings wurde er dann in der Prüfung für den Smith-Preis mit dem *wrangler* Edward Routh gleichgestellt. Die Veröffentlichung der ersten Arbeit über Kraftlinien mit dem Titel *Über Faraday's Kraftlinien* fällt in die letzten beiden Jahre seines ersten Aufenthalts in Cambridge. Diese Arbeit besteht aus drei Teilen. Der erste Teil betrachtet die Anwendung der Faraday'schen Kraftlinien auf statische Zustände und stationäre Strömungen, der zweite Teil den Faraday'schen elektrotromagnetischen Zustand, während der dritte Teil eine Anzahl von Beispielen behandelt.

Im Jahre 1856 wurde Maxwell im Alter von 25 Jahren Professor für Naturphilosophie an dem Marischal College in Aberdeen, der drittgrößten Stadt Schottlands. Er verbrachte die sechs Monate des akademischen Jahres in Aberdeen und die anderen sechs Monate in Glenlair. Im Jahre 1860 wurden das Marischal College und das benachbarte King's College in Aberdeen zur Universität Aberdeen zusammengelegt. Da es an der neu gegründeten Universität Aberdeen keinen Platz für zwei Professoren für Naturphilosophie gab, musste Maxwell Aberdeen verlassen. Er erhielt aber nach kurzer Zeit einen Lehrstuhl für Naturphilosophie am King's College in London. Die Jahre in London gehören zu den produktivsten seiner wissenschaftlichen Karriere. Er erhielt im Jahre 1860 die Rumford-Medaille der britischen Königl. Gesellschaft für seine Arbeiten über Farben. 1861/1862 wurde die zweite Arbeit über Kraftlinien mit dem Titel *Über physikalische Kraftlinien* veröffentlicht, die aus

vier Teilen besteht. Der erste Teil behandelt die theoretische Beschreibung der Erscheinungen des Magnetismus, der zweite Teil die der elektrischen Ströme, der dritte Teil die der Elektrostatik und der vierte Teil die der Wirkung des Magnetismus auf polarisiertes Licht, den Faraday-Effekt. Maxwell hatte mit Sicherheit schon in Aberdeen begonnen, an diesen Themen zu arbeiten. In seiner Londoner Zeit hatte er regelmäßig Kontakt mit Michael Faraday (der fast 40 Jahre älter als Maxwell war und 1867 verstarb), insbesondere bei seinen Besuchen von Vorlesungen an der Königlichen Anstalt von Großbritannien. Eine große Freundschaft bestand nicht zwischen ihnen, aber sie hatten großen Respekt vor den Talenten des anderen.

Im Jahre 1865 legte er seine Professur am King's College in London nieder und kehrte nach Glenlair zurück. Im Jahre 1871 wurde Maxwell als erster Cavendish Professor für Physik an die Universität Cambridge berufen und übernahm dort die Leitung des Aufbaus des Cavendish Laboratoriums. In diesen Jahren schrieb er mehrere Bücher und beschäftigte sich mit dem physikalischen Einheitensystem. Eine seiner letzten großen Beiträge zur Wissenschaft war die Herausgabe der Forschungsarbeiten über Elektrizität von Henry Cavendish. Maxwell starb am 05. November 1879 in Cambridge im Alter von nur 48 Jahren.

## Über Faradays Kraftlinien

Nach seinem Abschluss an der Universität Cambridge im Jahre 1854 beschäftigte sich Maxwell eingehend mit den experimentellen Untersuchungen von Faraday. In Faraday fand er einen Geist, der ihm sehr ähnlich war. Maxwell sah den Zusammenhang zwischen Faradays Sichtweise und dem Zugang, den Mathematiker einschlagen würden. Das Faraday'sche Konzept eines Mediums übernahm Maxwell als Leitfaden in seine Arbeiten über Elektrizität und Magnetismus.

Bis zum sechzehnten Jahrhundert wusste man sehr wenig über Elektrizität, im Prinzip nur, dass Bernstein, wenn man es reibt,

die Kraft besitzt, leichte Körper anzuziehen. In der zweiten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts zeigte Coulomb durch seine Experimente, dass die Abstößung bzw. Anziehung zwischen zwei kleinen Körpern, die elektrisch geladen sind, von deren Ladungen und Abstand abhängt. Die mathematische Theorie der Elektrizität wurde ungefähr zur selben Zeit von Cavendish begründet, dessen Abhandlungen aber erst ungefähr 100 Jahre später von Maxwell herausgegeben wurden. Ebenso wichtig waren die experimentellen Arbeiten von Cavendish zu dem Gesetz der elektrischen Anziehung bzw. Abstößung. Cavendish bewies schlüssig, dass die Anziehung bzw. Abstößung zweier kleiner, geladener Körper sich direkt mit dem Produkt der beiden Ladungen sowie mit dem Inversen des Quadrates des Abstandes zwischen ihnen ändert, so dass das Kraftgesetz für geladene Teilchen dem Gravitationsgesetz von Newton entspricht, mit dem einzigen Unterschied, dass die Kraft zwischen gleichartig geladenen Körpern abstößend und zwischen entgegengesetzt geladenen Körpern anziehend ist. Außer einigen theoretischen Arbeiten von Simeon-Denis Poisson und George Green wurde in den nächsten Jahren auf dem Gebiet der Elektrostatik wenig Neues hinzugefügt, bis Faraday begann sich diesem Thema zu widmen. Da viele Ergebnisse von Cavendish zu diesem Zeitpunkt nicht veröffentlicht und auch nicht bekannt waren, hat Faraday einige von Cavendishs Ergebnissen unabhängig von ihm und völlig selbstständig gewonnen. Deshalb konnte Faraday einen eigenen, vollkommen eigenständigen Weg bei seinen Arbeiten einschlagen.

Pierre-Simon Marquis de Laplace, Joseph-Louis Lagrange, Poisson und andere hatten die mathematische Theorie der Anziehung von Körpern (elektrostatisch oder gravitativ) weit entwickelt, so dass viele Probleme in der Elektrizität mit deren Methoden gelöst werden konnten. Diese theoretischen Modelle basierten alle auf der so genannten Fernwirkung (*action at a distance*), bei dem sich eine physikalische Wirkung instantan (zum selben Zeitpunkt) über beliebig große Entfernungen bemerkbar macht. Faraday war aber mit der Hypothese der Fern-



wirkung zwischen geladenen Teilchen nicht zufrieden und suchte deshalb nach einem Mechanismus, wie die elektrische und elektromagnetische Wirkung im Raum von Punkt zu Punkt übertragen werden können. Allerdings ist die resultierende Kraft auf einen elektrisch geladenen Körper und der induzierte Strom in einem beliebigen elektrischen Leiter unabhängig davon, ob man die Hypothese der Fernwirkung verwendet oder die Hypothese der Übertragung der elektrischen Wirkung über Linien, gerade oder gekrümmte, durch ein dazwischen liegendes Medium. Aber jede Sichtweise, ob die Argumente nun schlüssig sind oder nicht, ist für sich gesehen nützlich, sofern sie dazu führt, dass die beobachteten Phänomene weiter untersucht werden. Deshalb waren Faradays Vorstellungen von Kräftelinien, die durch ein Medium durchgehen und dabei Spannungen und Druck ausüben, außerordentlich wichtig für das folgende Verständnis von Elektrizität und Magnetismus.

Maxwell schrieb selbst in dem Vorwort zu seinem Buch *A Treatise on Electricity and Magnetism* über die Faraday'sche Sichtweise: „... bevor ich das Studium der Elektrizität begann, beschloss ich, keine mathematischen Abhandlungen über dieses Thema zu lesen, solange ich nicht Faradays *Experimentelle Erkundungen über Elektrizität* gelesen hatte. Ich war mir bewusst, dass es einen Unterschied zwischen Faradays Betrachtungsweise und der der Mathematiker gab, so dass weder Faraday noch die Mathematiker mit der Sprache des jeweils anderen zufrieden sein würden. Ich war auch davon überzeugt, dass dieser Zwiespalt nicht dadurch verursacht wurde, dass einer von beiden falsch lag. Ich wurde davon zuerst von Sir William Thomson überzeugt, dessen Rat und Unterstützung sowie dessen publizierte Arbeiten ich den größten Teil der Dinge, die ich über dieses Gebiet gelernt habe, verdanke. Während ich meine Studien der Faraday'schen Arbeiten fortsetzte, erkannte ich, dass Faradays Methode die Phänomene zu begreifen, ebenfalls eine mathematische war, allerdings ohne die übliche Form der mathematischen Symbole. Ich fand außerdem heraus, dass diese Methoden sich auch in der gebräuchlichen mathematischen

Form ausdrücken lassen sind deshalb mit denen von erklärten Mathematikern vergleichbar sind. Zum Beispiel sah Faraday in seinem geistigen Auge den ganzen Raum durchquerende Kraftlinien, wo die Mathematiker Kraftzentren, die sich aus der Ferne anziehen, sahen. Faraday sah ein Medium, wo die Mathematiker nichts anderes als Ferne sahen. Faraday suchte den Platz der Phänomene in realen Wirkungen innerhalb des Mediums, den Mathematikern genügte es, dass sie ihn in der Macht der Fernwirkung eingeträgt auf die elektrischen Flüssigkeiten gefunden hatten.<sup>1</sup>

Angenommen ein kleiner, positiv geladener Körper befindet sich in unmittelbarer Nähe zu einer positiv geladenen Fläche und bewegt sich stets in der Richtung, in der er durch die auf ihn wirkende Kraft getrieben wird. Dieser kleine Körper wird selbstverständlich von dieser Fläche abgestoßen und bewegt sich entlang einer Bahn, gerade oder gekrümmt, und wird seine Bewegung mit einer mit zunehmender Entfemung abnehmenden Kraft unbegrenzt fortsetzen, sofern er nicht auf eine negativ geladene Fläche trifft, die ihn anzieht und in der er dann verschwindet. Die Bahn, die durch einen solchen kleinen, geladenen Körper verfolgt wird, stellt die Faraday'sche Kraftlinie dar, welche deshalb einer Linie entspricht, dessen Richtung in jedem Punkt mit der resultierenden Kraft an diesem Punkt übereinstimmt. Solche Kraftlinien entspringen immer positiv geladenen Flächen und enden auf negativ geladenen Flächen. Anderenfalls erstrecken sie sich bis ins Unendliche. Die Kraftlinien, die einem positiv geladenen Körper entspringen, der sich in einem Raum befindet, der keine anderen negativ geladenen Körper enthält, enden im Allgemeinen an den Wänden, dem Boden und der Decke des Raumes oder an Objekten, die sich in dem Raum befinden und die eine elektrische Verbindung mit diesen besitzen. Faraday stellte sich so die Gesamtheit des Raumes vor, in dem die elektrische Kraft wirkt und der von den Kraftlinien durchdrungen

1. James Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Vol. 1 (Clarendon Press, Oxford, 1873), S. 33-3.

wird, die an jedem Punkt die Richtung der resultierenden Kraft an diesem Punkt beschreiben. Aber Faraday ging noch einen Schritt weiter: Die Kraftlinien enthalten auch Informationen über die Stärke der Kraft an jedem Punkt im Raum. Wenn die Stärke groß ist, liegen die Linien eng beieinander; liegen die Linien dagegen weit auseinander, ist die Stärke der Kraft klein. Da die Kraft in unmittelbarer Nähe eines kleinen geladenen Körpers proportional zu dessen Ladung ist, zeichnete Faraday, von jeder möglichen positiv geladenen Fläche ausgehend, eine Anzahl von Kraftlinien, die proportional zur Ladung dieser Fläche ist. Ebenso endete eine ähnliche Anzahl von Kraftlinien in jeder negativ geladenen Fläche.

Maxwell stellte seine Arbeit *Ueber Faraday's Kraftlinien* der Philosophischen Gesellschaft von Cambridge am 10. Dezember 1855 und 11. Februar 1856 vor. In dieser dreiteiligen Arbeit zeigte er, dass, falls man ein System von Linien nach der Methode von Faraday zeichnen könnte, auf Grund des Gesetzes der elektrischen Wirkung, die umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung ist, die Anzahl der Kraftlinien, die durch eine Einheitsfläche senkrecht zur Kraft hindurchtreten, proportional zur Größe der Kraft in der Umgebung ist. Weiterhin ist die Anzahl der Linien, die durch eine Einheitsfläche irgendeiner anderen Fläche hindurchtreten, proportional zu der Komponente der Kraft, die senkrecht auf dieser Fläche steht. Maxwell stellte sich also die positiv geladenen Flächen, auf denen die Linien beginnen, aufgeteilt in Gebiete vor, jedes von ihnen eine Einheit der Elektrizität enthaltend. Die Kraftlinien sollten durch jeden Punkt des Randes gezeichnet werden. Diese Linien teilen den gesamten Raum in so genannte Einheitsröhren auf, deren Ränder die Kraftlinien darstellen. Gleichzeitig zeigte er, dass auf Grund des Gesetzes des Inversen der Abstandsquadrate die Kraft an jedem Punkt in jeder Richtung umgekehrt proportional zu dem Flächeninhalt des Querschnitts der Einheitsröhre der Kraft ist, die durch eine Ebene senkrecht zu dieser Richtung erzeugt wird.

Maxwell zeigte weiter, dass auf der negativ geladenen Fläche, auf der diese Röhren enden, jede Röhre eine Einheit der negati-



ven Ladung einschließt. Folglich wird, wenn eine metallische Fläche, die die Kraftlinien schneidet und senkrecht zur Röhre steht, betrachtet wird, eine Einheit der negativen Ladung auf jedem Querschnitt der Fläche, die innerhalb einer Spur der Kraftröhre liegt, vorhanden. In einem isotropen Medium stellen diese Einheitsröhren der Kraft auch Einheitsröhren der Induktion dar. Wenn also ein System von Kraftröhren in Verbindung mit einem geladenen System gezeichnet wird, wird der gesamte Raum, in dem die Kraft wirkt, in Röhren aufgeteilt, wobei jede von diesen Röhren einer Einheit der positiven Ladung entspringt und in einer Einheit der negativen Ladung endet, während die Richtung der Kraft in jedem Punkt durch die Richtung der Röhre gekennzeichnet wird. Die Größe der Kraft ist umgekehrt proportional zu dem Flächeninhalt des Querschnitts der Röhre. Wenn jetzt das Kraftgesetz irgendeine andere Abhängigkeit als vom Inversen des Abstandsquadrates besitzen würde und die Röhren so gezeichnet werden müssen, dass sie von einer geladenen Fläche unter der Voraussetzung ausgehen, dass der Flächeninhalt eines jeden Querschnitts einer Röhre umgekehrt proportional zu der Kraft quer über den Querschnitt ist, dann würde zwischen diesen Röhren entweder Platz bleiben, während sie sich von der Fläche entfernen, oder sie würden sich schneiden. Deshalb kann das eingeführte System der Röhren nur dann eine sinnvolle Beschreibung ergeben, wenn das Kraftgesetz die inverse Abhängigkeit vom Abstandsquadrat besitzt.

Faraday wies darauf hin, dass nicht nur entlang einer jeden Kraftlinie eine Spannung erzeugt wird, sondern dass die verschiedenen Linien sich gegenseitig abstoßen. Maxwell zeigte, dass eine Spannung entlang der Kraftlinien verbunden mit einem gleichen Druck in jede Richtung senkrecht zu diesen Linien im Einklang mit dem Gleichgewicht des Mediums ist. Mit einem Bild des Stromens von Wasser in einem Fluss wies Maxwell darauf hin, dass die Strömungen oder Bahnen, auf denen sich die Wasserteilchen fortbewegen, den Kraftlinien entsprechen, während die Geschwindigkeit des Wassers der Stärke der Kraft entspricht. Wenn man den Fluss in Röhren, deren Ränder die Fluss-

linien darzustellen, aufteilt und wenn diese Röhren so gerichtet würden, dass ein Einheitsvolumen des Wassers durch einen bestimmten Querschnitt einer jeden Röhre pro Sekunde hindurchtreten würde, dann träte für einen stationären Strom ein Einheitsvolumen des Wassers durch jeden Querschnitt einer jeden Röhre pro Sekunde hindurch, da kein Wasser durch die Röhre ein- oder austritt außer an deren Enden. Solche Röhren kann man Einheitsröhren des Stromes nennen und, solange der Fluss keine Nebenflüsse besitzt, wird immer dieselbe Anzahl der Einheitsröhren jeden Abschnitt des Flusses kreuzen. Wenn sich das Flussbett erweitert, wächst der Querschnitt einer jeden Röhre, aber immer umgekehrt proportional zu der Geschwindigkeit des Wassers. Folglich ist die Anzahl der Einheitsröhren des Stromes, die irgendeine Flächeneinheit in einem Querschnitt des Flusses schneidet, proportional zur Geschwindigkeit des Wassers in der Umgebung. Solch ein System von Röhren stellt dabei sowohl die Richtung der Bewegung als auch die Geschwindigkeit des Wassers in jedem Punkt dar und entspricht deshalb genau einem System von Einheitsröhren der elektrischen Kraft.

Faraday schrieb im März 1857, nachdem er diese erste Arbeit von Maxwell erhalten hatte, folgende Zeilen an Maxwell: „Mein lieber Herr – Ich habe Ihr Manuskript erhalten und danke Ihnen sehr dafür. Ich sage nicht, dass ich mir erlaube, Ihnen für das, was Sie über die ‚Kraftlinien‘ geschrieben haben, zu danken, da ich genau weiß, dass Sie es aus Interesse an der philosophischen Wahrheit getan haben. Aber glauben Sie mir, es ist eine Arbeit, die mir sehr wohltut, und sie gibt mir sehr viel Ermutigung darüber nachzudenken. Am Anfang war ich fast erschrocken, als ich die mathematische Wucht gesehen habe, die auf dieses Thema angewandt wird. Dann war ich aber verwundert zu sehen, wie das Thema diesem standhält.“<sup>4</sup>

Besonders wichtig ist die Feststellung, dass die Arbeit von Maxwell über Faradays Kraftlinien im Prinzip nur eine Überbet-

4 Lewis Campbell und William Garnett: *The Life of James Clerk Maxwell* (MacMillan and Co., London, 1892), S. 514–520.

zung der Faraday'schen Ideen in eine mathematische Sprache mit Illustrationen und Erweiterungen ist. Die Arbeit macht keinen Versuch, die Art der Wirkung im Dielektrikum bzw. die Mechanismen, die zu den beobachteten Effekten führen, zu erklären. Allerdings basiert die gesamte Beschreibung bzw. Mathematisierung der Beschreibung mittels elektro- und magnetostatischen Feldern auf einer Analogie zur Hydrodynamik, allerdings auf der Basis von laminaren Strömungen und dem Strömungsfeld einer idealen, inkompressiblen, viskosen, masselosen Flüssigkeit. Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt der Maxwell'schen Betrachtungsweise war die Behandlung sowohl der elektrischen als auch der magnetischen Phänomene mit demselben Formalismus.

## Über physikalische Kraftlinien

Ungefähr fünf Jahre nach der Vorstellung der ersten Arbeit über Faradays Kraftlinien folgte eine zweite Arbeit, die aus insgesamt fünf Veröffentlichungen in vier Teilen besteht, die im *Philosophical Magazine* in den Jahren 1861 und 1862 erschienen. In der ersten Arbeit von 1855/1856 hatte Maxwell eine klare geometrische Vorstellung vom der Beziehung des Verlaufs der Kraftlinien zur Beschaffenheit des magnetischen Feldes gegeben. In dieser zweiten Arbeit wurden die elektrischen und magnetischen Phänomene nun von einem mechanischen Gesichtspunkt aus betrachtet. Die zueinander unabhängigen Phänomene der Elektrizität und des Magnetismus wurden mit einer Theorie der Molekularwirbel beschrieben, die eine gewisse Analogie zur Hydrodynamik unter Einbeziehung von nicht laminaren Strömungsfeldern, d.h. Turbulenzen bzw. Verwirbelungen, besitzt. Maxwell untersuchte, welche Spannungen oder Bewegungen eines Mediums im Stande sind, die beobachteten mechanischen Phänomene hervorzubringen. Insbesondere interessierten ihn die magnetische Anziehung, die Wirkung elektrischer Ströme aufeinander und auf Magneten, die elektromagnetische Induk-

tion sowie die Drehung von polarisiertem Licht beim Durchgang durch ein Magnetfeld.

Im ersten Teil betrachtet Maxwell die magnetischen Phänomene von einem mechanischen Gesichtspunkt aus. Er untersucht, welche Spannungen oder Bewegungen eines Mediums im Stande sind, die beobachteten mechanischen Phänomene zu erklären. Er schreibt auf Seite 5 der Arbeit *Über physikalische Kraftlinien*: „Falls wir durch dieselbe Annahme die Phänomene der magnetischen Anziehung mit den elektromagnetischen Phänomenen und mit denen der induzierten Ströme in Verbindung bringen können, haben wir eine Theorie gefunden, die, falls sie nicht wahr sein sollte, nur durch Experimente als fehlerhaft nachgewiesen werden könnte. Dadurch würde unsere Kenntnis dieses Gebiets der Physik deutlich erweitert.“ (Übersetzung: H. T. Grahn)

Coulomb hatte gezeigt, dass das Gesetz der inversen Abstandsquadrate ebenso für die magnetische Abstoßung wie für die elektrische gilt, so dass die Kraft zwischen zwei magnetischen Polen proportional zu dem Produkt der Polstärken und umgekehrt proportional zu deren Abstandsquadrat ist. Mit Hilfe von Feilspänen, die oberhalb der Pole auf einem Blatt Papier ausgestreut werden und die durch Induktion in Richtung der resultierenden magnetischen Kraft magnetisiert werden, kann man die magnetischen Feldlinien sichtbar machen. Dieses Experiment hatte Faraday zuerst auf die reale Existenz von solchen Linien aufmerksam gemacht. Da Faraday es sich nicht vorstellen konnte, dass diese gekrümmten Linien durch Fernwirkung entstehen können, nahm er an, dass es ein Medium geben muss, das die magnetische und elektrischen Kräfte überträgt. Maxwells größte Beiträge zur Elektrizitätslehre sind die Untersuchungen der Eigenschaften dieses Mediums, die für die beobachteten elektrischen und magnetischen Wirkungen verantwortlich sind, die Erklärung dieser Wirkungen und die Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichts aus rein elektromagnetischen Betrachtungen basierend auf der Annahme der Existenz eines solchen Mediums.