

Ian Roulstone  
John Norbury

# Unsichtbar im Sturm

Die Rolle der Mathematik  
in der Wettervorhersage



Springer Spektrum

---

Unsichtbar im Sturm

---

Ian Roulstone · John Norbury

# Unsichtbar im Sturm

Die Rolle der Mathematik in der  
Wettervorhersage

Übersetzt von: Annette Müller

 **Springer** Spektrum

Ian Roulstone  
Department of Mathematics  
University of Surrey  
Guilford, Surrey, UK

John Norbury  
Mathematical Institute  
University of Oxford  
Oxford, UK

Übersetzt von:  
Annette Müller  
Freie Universität Berlin  
Institut für Meteorologie

ISBN 978-3-662-48253-7      ISBN 978-3-662-48254-4 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-48254-4>

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

Springer Spektrum

Übersetzung der englischen Ausgabe: *Invisible in the Storm. The Role of Mathematics in Understanding Weather* von Ian Roulstone und John Norbury, erschienen bei Princeton University Press 2013,

© Princeton University Press 2013. Alle Rechte vorbehalten.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Für die meisten von uns sind die Fachgebiete der Meteorologie und der Mathematik eine andere Welt: Wie kann uns die Differenzialrechnung etwas über die Entstehung von Schneeflocken verraten? Doch in den letzten beiden Jahrhunderten hat die Mathematik eine immer wichtigere und entscheidende Rolle für die Entwicklung der Meteorologie und der Wettervorhersage gespielt.

Dank der kontinuierlichen Weiterentwicklung der modernen Computer können heute im Minutentakt unglaublich viele Berechnungen durchgeführt werden. Jeden Tag nutzen Meteorologen diese enormen Rechenleistungen, um das Wetter des nächsten Tages vorherzusagen. Aber um den Wert der heutigen Wettervorhersage schätzen zu lernen und um zu begreifen, warum sie gelegentlich doch noch daneben liegt, müssen wir verstehen, wie das Verhalten der Atmosphäre und der Ozeane mithilfe der Mathematik quantifiziert werden kann.

Computeroperationen beruhen auf mathematischen Vorschriften, und diese Berechnungen folgen abstrakten, logischen Regeln. Daher ist es notwendig, sowohl den aktuellen Zustand als auch die Änderungen in der Erdatmosphäre in einer angemessenen mathematischen Sprache darzustellen, um sie auf Computern umsetzen zu können. Allerdings ist aus zwei wichtigen Gründen ein Problem stets gegenwärtig. Zum einen werden wir nie alle Wechselbeziehungen von Wolken, Regen und wirbelnden Windböen verstehen, und zweitens können Computer bei der Erstellung einer Vorhersage nur eine endliche Anzahl von Berechnungen ausführen.

So stehen Meteorologen vor einer interessanten Herausforderung: Wie erfasst man das wesentliche Verhalten der Atmosphäre, ohne von dem fehlendem Wissen davongeblassen zu werden? Mit dieser Herausforderung beschäftigten sich schon die Pioniere der Wettervorhersage – lange bevor es moderne Computer gab. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts konnte man die physikalischen Grundgleichungen aufstellen, welche die Atmosphärenbewegung beschrieben; die Aufmerksamkeit richtete sich nun auf das Finden von Lösungen, welche das Wetter vorherzusagen.

Dieses Buch beschreibt die Rolle der Mathematik, die sich bei unseren immer noch anhaltenden Bemühungen, das Wetter und Klima zu verstehen und vorherzusagen, herausbildete. Eine relativ kleine Gruppe aus Mathematikern und Physikern mit sehr unterschiedlichen Werdegängen hatte sich im frühen 20. Jahrhundert daran gemacht, die Meteorologie

zu einer exakten und quantitativen Wissenschaft zu machen. Ihre Geschichte selbst ist schon faszinierend und lehrreich, und ihr Erbe ist mehr als die Gründung der modernen Wettervorhersage – sie zeigten uns, warum die Verbindung von Mathematik und Meteorologie stets die Basis der Wissenschaft der Wetter- und der Klimavorhersage sein wird.

Aber während man erkannte, dass die Vorhersage des nächsten Sturmes ein schwieriges Problem der Wissenschaft ist, entdeckten Mathematiker – während sie das Geheimnis der Stabilität des Sonnensystems erforschten – das Chaos. Sie beschäftigten sich mit der wichtigen Frage, ob Planeten ihre Bewegungen um die Sonne für immer fortsetzen werden oder ob eine zufällige Kollision – beispielsweise mit einem Meteor – irgendwann zu einer vollkommen anderen zukünftigen Bewegung führen könnte.

Heute erweitern die Meteorologen ständig die Grenzen dessen, was im Rahmen der physikalischen Gesetze vorhersagbar ist, immer mehr. Ständige Verbesserungen der Vorhersageverfahren ermöglichen immer zuverlässigere Prognosen, wofür wir aber auch immer größere Computer, bessere Software und genauere Beobachtungen benötigen. Bei modernen Supercomputern übersteigt die für die Datenverarbeitung benötigte Kapazität beinahe unser Vorstellungsvermögen. Aber die Mathematik lässt uns inmitten der Fülle von Informationen eine Ordnung erkennen.

In der ersten Hälfte dieses Buches beschreiben wir vier historische Schlüsselentwicklungen in der Wettervorhersage: Wir erklären erstens, wie wir lernten, die Atmosphäre zu vermessen und zu beschreiben; zweitens gehen wir darauf ein, wie wir dieses Wissen durch physikalischer Gesetze abbilden können; drittens zeigen wir, wie wir lernten, diese physikalischen Gesetze mithilfe der Mathematik auszudrücken und wie auf diese Weise die Erstellung von Vorhersagen möglich wurde; und viertens erörtern wir, wie wir lernten, den Teufel im Detail zu erkennen – das Phänomen, das wir Chaos nennen.

Die zweite Hälfte des Buches beschreibt den modernen Ansatz nach den 1930er-Jahren, bei dem das Zusammenspiel von Mathematik und Technik unsere Fähigkeiten, das zukünftige Wetter und Klima vorherzusagen, enorm verbesserte. Der Zweite Weltkrieg und die darauf folgende Ausweitung von ziviler und militärischer Luftfahrt führten zu neuen Aufgaben der Meteorologie und trieben die Entwicklungen verschiedener Technologien – wie beispielsweise Radar, Satelliten und nicht zuletzt Computer – voran. Die technologische Revolution ermöglichte im Jahr 1949 den Durchbruch – die erste computerbasierte Wettervorhersage. Aber hinter dieser gut dokumentierten Pionierarbeit verbirgt sich die weniger bekannte Geschichte über die Rolle der Mathematik bei der Entdeckung eines Schlüssels zur erfolgreichen, computergestützten Vorhersage. Daher beschreiben wir am Ende unserer Geschichte, wie heute die Mathematik von den Meteorologen genutzt und weiterhin genutzt werden wird, um das Vorhersagbare vom Unvorhersagbaren zu trennen. Diese Unterscheidung wird sogar noch wichtiger, wenn wir das zukünftige Klima verstehen und vorhersagen wollen.

Zur wissenschaftlichen Vollständigkeit haben wir in den Vertiefungen die fachspezifischen Informationen ausführlicher dargestellt. Das Buch ist so gestaltet, dass diese Vertiefungen ausgelassen werden können und das Gesamtkonzept dennoch verstanden wird. Im Glossar, das auf das Nachspiel folgt, werden auf einfache Weise die Konzepte erklärt, welche für die Entwicklung der computerbasierten Wettervorhersage genutzt werden.

---

## Danksagung

Unseren vielen Freunden, Familien und Kollegen schulden wir Dank für die wertvollen Diskussionen und kritischen Feedbacks in all den Jahren, in denen wir geforscht und dieses Buch geschrieben haben. Diesbezüglich danken wir Sid Clough, Mike Cullen, Jonathan Deane, Dill Faulkes, Seth Langford, Peter Lynch, Kate Norbury, Anders Persson, Sebastian Reich, Hilary Small, Jean Velthuis und Emma Warneford. Insbesondere danken wir Andy White für sein sehr sorgfältiges Lesen und Kommentieren des vorletzten Manuskriptentwurfs.

Wir danken auch Sue Ballard, Ross Bannister, Stephen Burt, Michael Devereux, David Dritschel, Ernst Hairer, Rob Hine, Rupert Holmes, Steve Jebson, Neil Lonie, Dominique Marbouty, John Methven, Alan O'Neill, Norman Phillips, David Richardson, Claire Roulstone und Mike White für ihre Hilfe bei den Illustrationen.

Wir bedanken uns auch bei den folgenden Organisationen, die Bilder zur Verfügung gestellt haben, und insbesondere bedanken wir uns bei den Mitarbeitern der American Meteorological Society, der University of Dundee, dem Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF), dem Met Office, der National Meteorological Library und der Royal Society of London für ihre wertvolle Hilfe. Ian Roulstones großer Dank gilt der Unterstützung 2008–2009 durch den Leverhulme Trust.

Wir bedanken uns bei Vickie Kearn bei Princeton University Press für ihre Geduld und ständige Ermutigung und bei vielen ihrer damaligen und jetzigen Kollegen, darunter Kathleen Cioffi, Quinn Fusting, Dimitri Karetnikov, Lorraine Doneker, Anna Pierrehumbert, Stefani Wexler und Patti Bower für ihre Hilfe bei der Erstellung dieses Buches.

Schließlich sind die Liebe und die Unterstützung unserer Familien von unschätzbarem Wert, und wir widmen ihnen dieses Buch.

---

# Inhaltsverzeichnis

<i>Vorspiel: Neuanfänge</i> .....	1
<b>1. Eine Vision wird geboren</b> .....	3
<b>2. Von Überlieferungen zu Gesetzen</b> .....	41
<b>3. Fortschritte und Missgeschicke</b> .....	79
<b>4. Wenn der Wind den Wind weht</b> .....	113
<i>Zwischenspiel: Ein Gordischer Knoten</i> .....	145
<b>5. Begrenzung der Möglichkeiten</b> .....	149
<b>6. Die Metamorphose der Meteorologie</b> .....	179
<b>7. Mit Mathematik zum Durchblick</b> .....	217
<b>8. Im Chaos vorhersagen</b> .....	255
<i>Nachspiel: Jenseits des Schmetterlings</i> .....	295
<b>Glossar</b> .....	299
<b>Bibliografie und weiterführende Literatur</b> .....	301
<b>Sachverzeichnis</b> .....	305





## Vorspiel: Neuanfänge

Ende des 19. Jahrhunderts nutzten die Menschen Newtons Gesetze der Bewegung und Gravitation, um die Sonnenauf- und -untergangszeiten, die Mondphasen und die Gezeiten von Ebbe und Flut zu berechnen. Sorgfältig trugen sie die Daten in Kalender und Tagebücher ein, sodass diese erfolgreichen Anwendung der Wissenschaft für viele Menschen, von Fischern bis hin zu Bauern, nützlich war. Im Jahr 1904 veröffentlichte dann ein norwegischer Wissenschaftler einen Aufsatz, in dem er umriss, wie man die Schwierigkeiten der Wettervorhersage als mathematische und physikalische Fragestellung formulieren könnte. Seine Betrachtungsweise wurde ein Eckpfeiler der modernen Wettervorhersage. Während der nächsten drei Dekaden folgten viele junge, talentierte Wissenschaftler dieser Idee – ihre Forschungen legten die Grundlage der heutigen Meteorologie.

Zu dieser Zeit machte sich aber niemand Illusionen darüber, wie schwer es sein würde, Wettervorhersagen tatsächlich zu berechnen. Den Wind und den Regen, die Feucht- und Trockenzeiten (durch Herausarbeiten der Luftdruckänderungen), die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit des ganzen Planeten vorherzusagen, wurde als ein Problem von nahezu unermesslicher Komplexität erkannt.

In dieser Geschichte beschreiben wir die Entwicklung der Rolle von Physik, Computern und Mathematik bei der Vorhersage unseres ständig wechselnden Wetters. Dabei ist die Mathematik nicht nur eine wichtige Sprache, die das Problem definiert, sondern wir können mit ihrer Hilfe auch Lösungen auf modernen Supercomputern finden. Heute nutzen wir die Mathematik, um immer mehr Informationen aus dem zu gewinnen, was die Computer berechnen, und dies dann für die Erstellung der Wettervorhersage zu verwenden. Wettervorhersagen beeinflussen viele Entscheidungen unsere Alltagslebens – das beginnt damit, dass wir einen Regenschirm mit zur Arbeit nehmen, und endet in Maßnahmen, die wir ergreifen, um beispielsweise in der Zukunft Gemeinden vor Überflutungen zu schützen.

Satellitenbilder von der Erde, wie beispielsweise Abb. 1, haben die Sicht vieler Menschen auf unser Zuhause verändert. Wir erkennen die Allgegenwart von Wasser in seinen vielen verschiedenen Zuständen: von Ozeanen und Eisflächen bis zu Wolken und Regen, die uns

jeden Tag begleiten. Wolkenmuster zeigen den Wind, der Wärme von den Tropen wegtransportiert und die Eisflächen von uns fernhält. Können sich Wettersysteme verändern? Wenn ja, wie sähe die Konsequenz in Bezug auf die Verteilung des Lebens und des Wassers in all seinen verschiedenen Formen aus? In diesem Buch betrachten wir die Erdatmosphäre und erklären, wie uns die Mathematik ermöglicht, den endlosen Zyklus von Wetter und Klima zu beschreiben.

**Abb. 1** Dieses Bild unseres blauen Planeten ist der NASA-Website entnommen und zeigt verwirbelte Wolkenstrukturen rund um die Erde. Ist es möglich mithilfe der Mathematik zu berechnen, wie sich die Wolkenstrukturen in den nächsten fünf Tage verändern werden oder wie sich die Eisflächen in der Arktis wandeln? (© NASA. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)





# 1. Eine Vision wird geboren

Unsere Reise beginnt am Ende des 19. Jahrhunderts, kurz bevor die „Äthertheorie“, die Raum, Zeit und Materie erklären sollte, von Einsteins Relativitätstheorie und der Quantenmechanik endgültig zu Grabe getragen wurde. Bei seinen Forschungen zum Äther machte ein norwegischer Wissenschaftler eine bemerkenswerte Entdeckung, welche der Meteorologie ganz neue Wege eröffnete.

## Ein Phönix erwacht

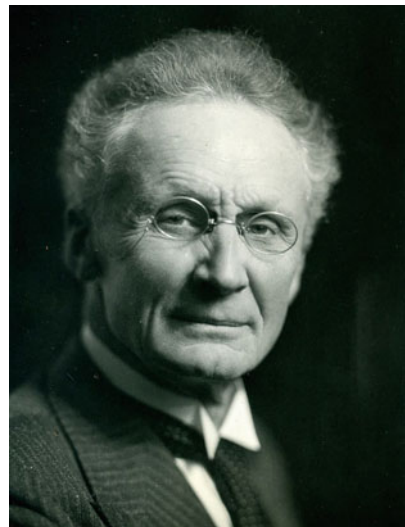
Der 36-jährige Vilhelm Bjerknes spähte an einem bitterkalten Nachmittag im November 1898 nachdenklich durch sein Fenster auf den bleigrauen Himmel über der Stadt. Stockholm bereitete sich für den Winter vor. Seit dem frühen Morgen fiel Schnee, ein frischer Nordwind war aufgezogen und dicke Flocken fielen vom Himmel. Man kann sich gut vorstellen, wie sich Bjerknes an den Kamin setzte, um sich zu wärmen. Beim lodernden Feuer lehnte er sich zurück und ließ seine Gedanken schweifen. Obwohl der Schneesturm immer stärker wurde, fühlte er sich behaglich und zufrieden. Er war eins mit der Welt. Aber nicht nur weil er vor dem Wintereinbruch geschützt war; es ging tiefer. Bjerknes beobachtete einen glühenden Funken, der im Kamin herumwirbelte, bis er aus seinem Blickfeld verschwand. Dann wandte seine Aufmerksamkeit den größeren Wirbeln aus Wind und Schnee draußen zu und wenig später wieder dem Tanz des Rauchs und der Flammen zur heulenden Musik des Sturmes. All das tat er wie nie zuvor. Der spiralförmige Rauch über dem Feuer und das Stärkerwerden des Sturmes – Ereignisse, die der Mensch schon immer kannte – waren zwei Erscheinungsformen eines neuen physikalischen Gesetzes. Es würde ein kleiner Meilenstein werden – in der wissenschaftlichen Zeitgeschichte nicht so berühmt wie Newtons Gesetze der Bewegung und der Gravitation, aber es konnte immerhin grundlegenden Eigenschaften des Wetters erklären. Diese hervorragende Idee war bisher für die Meteorologen verborgen gewesen, verschlossen hinter der schweren Tür der Mathematik. Wir verdanken das neue

Gesetz Vilhelm Bjerknes (Abb. 1). Doch es sollte mehr als nur seinen Namen bewahren; es machte die Meteorologie zu einer innovativen Wissenschaft des 20. Jahrhunderts und ebnete den Weg zur modernen Wettervorhersage. Aber zunächst einmal musste dieses physikalische Gesetz seine Karriere auf eine ganz andere Bahn lenken.

Ironischerweise wollte Bjerknes nie mit seinen Ideen die Geschichte oder auch nur sein eigenes Schicksal so verändern, wie es dann geschah. Er empfand es zwar als aufregend, ein neues Fenster zu den Naturgesetzen geöffnet zu haben, doch er zermarterte sich auch den Kopf über seine Prioritäten und Ziele; und begann die Zukunft seiner Karriere zu hinterfragen. Seine neuentdeckte Vision entwickelte sich aus alten Vorstellungen der theoretischen Physik, die bald keine Zukunft mehr hatten. Seit einem halben Jahrhundert versuchten führende Physiker und Mathematiker bereits zu entscheiden, ob Phänomene wie Licht oder Kräfte wie beispielsweise Magnetismus durch den leeren Raum oder durch eine Art unsichtbares Medium wanderten. In den 1870er-Jahren vertraten immer mehr die Ansicht, dass der leere Raum mit einem unsichtbaren Fluid gefüllt sein müsse, man nannte es Äther. Die Idee war recht einfach: So wie sich Schallwellen durch die Luft ausbreiten und so wie sich zwei aneinander vorbeifahrende Boote gegenseitig spüren, weil sie das Wasser zwischen sich stören, so sollten auch Lichtwellen und Magnetkräfte durch eine Art kosmisches Medium wandern. Die Wissenschaftler versuchten die Eigenschaften eines derartigen Äthers zu verstehen und zu quantifizieren – in dem Glauben, dass er sich ähnlich verhält wie Wasser, Luft und andere Fluide, wenn sie von einem Objekt darin beeinflusst werden. Sie wollten die Existenz von Äther beweisen, indem sie zeigten, dass Experimente mit in Wasser tauchenden Objekten zu ähnlichen Effekten führten wie Experimente mit Magneten und elektrischen Geräten.

Auf der angesehenen internationalen Elektrizitätsausstellung 1881 in Paris, an der sich unter anderem Alexander Graham Bell und Thomas Alva Edison beteiligten, stellten ein

**Abb. 1** Vilhelm Bjerknes (1862–1951) formulierte die Wettervorhersage als ein mathematisch-physikalisches Problem



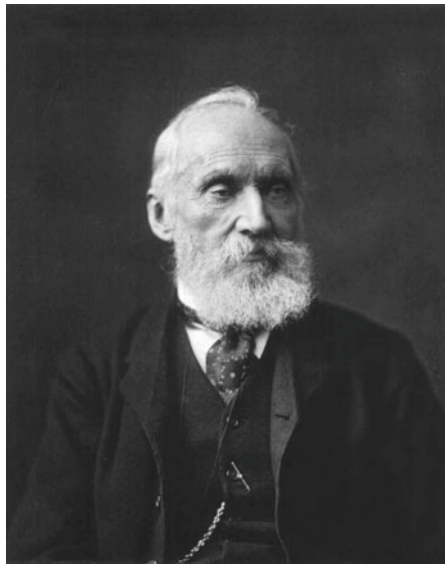
norwegischer Wissenschaftler mit dem Namen Carl Anton Bjerknes, Professor für Mathematik an der Royal Frederick Universität in Christiania (das heutige Oslo), und sein 18-jähriger Sohn Vilhelm ihre Experimente aus, welche die Existenz des Äthers belegen sollten. Besucher der Ausstellung, darunter einige hervorragende Wissenschaftler wie Hermann von Helmholtz und Sir William Thomson (der spätere Lord Kelvin), waren sichtlich beeindruckt. Bjerknes und sein Sohn gewannen hohe Anerkennung für ihre Ausstellung und gerieten dadurch ins Rampenlicht der internationalen Gemeinschaft der Physiker. Ihr wachsender Ruhm und ihr Ansehen führten zwangsläufig dazu, dass der junge, begabte Vilhelm in die Fußstapfen seines Vaters trat – nicht nur als Mathematiker und Physiker, sondern auch als Verfechter der Äthertheorie. Als Heinrich Hertz mit einigen außergewöhnlichen Experimenten die Existenz von sich im Raum ausbreitenden elektromagnetischen Wellen zeigte (die bereits von dem schottischen theoretischen Physiker James Clerk Maxwell vorausgesagt worden waren), wurde in den späten 1880er-Jahren noch intensiver an dieser Hypothese geforscht. Im Jahr 1894 skizzierte Hertz in seinem posthum veröffentlichten Buch seine Idee, welche wichtige Rolle der Äther in der Entwicklung der Mechanik spielen könnte.

Doch die Ausarbeitung dieser Ideen war keine Kleinigkeit. Heute lernen wir, dass die Wissenschaft der Mechanik geboren wurde, als Galileo Galilei den Begriff der Trägheit einführte, und Newton die Bewegungsgesetze quantifizierte, indem er Kraft und Beschleunigung miteinander in Beziehung setzte. Wir müssen nicht erwähnen, welchen Erfolg die Mechanik für die Beschreibung aller Bewegungen, von Tischtennisbällen bis hin zu Planeten, hatte. Aber Hertz glaubte, dass etwas fehlte, denn das großartige Bollwerk der Newton'scher Mechanik scheint auf einigen etwas vagen Vorstellungen aufzubauen. Axiomatisch legte er eine allgemeine Strategie dar, wie Erscheinungen innerhalb des Äthers Phänomene erklären könnten, die bisher die schwer fassbaren Vorstellungen von „Kraft“ und „Energie“ erforderten, die unsere Welt scheinbar beeinflussten, ohne dass es einen greifbaren Mechanismus dafür gab, wie dies geschieht. Das allgemeine Prinzip, das in Hertz' Buch dargelegt wurde, schien die von Vilhelms Vater initiierte Methode zu systematisieren. Carl Bjerknes' Arbeit fehlte jede untermauernde Argumentation, aber Hertz' Schrift versprach genau das zu ändern und würde so Bjerknes' Lebenswerk bestätigen. Das war ein bedeutender Antrieb für seinen Sohn. Gefesselt von Hertz' tiefgreifenden Ideen entschied sich Vilhelm dazu, seine ganze Energie in diese Weltsicht zu stecken.

Ihm wurde aber auch klar, dass ihn ein möglicher Erfolg mit dieser Methode an die Spitze der Physik bringen würde – eine vielversprechende Perspektive für einen zielgerichteten und ambitionierten jungen Wissenschaftler. Im 19. Jahrhundert hatten bereits bemerkenswerte Vereinigungen von Ideen und Theorien stattgefunden. Im Jahr 1864 hatte Maxwell einen Aufsatz veröffentlicht, in dem er Elektrizität und Magnetismus vereinigte – zwei bisher ganz unterschiedliche Phänomene. Auch das Konzept von Wärme, Energie und Licht erhielt eine gemeinsame Basis, und Vilhelm stellte sich vor, dass sich dieser Prozess der Vereinigung scheinbar ungleicher Bereiche der Physik fortführen lässt, bis das gesamte Fach auf Grundlage der Mechanik abschließt – eine „Mechanik des Äthers“. Schon bei der Verteidigung seiner Doktorarbeit im Jahr 1882 spielte er auf seine Vision an. Damals war er gerade

einmal 30 Jahre alt. Zwei Jahre später, nachdem seine Ideen auch von Hertz bestätigt wurden, machte er sich daran, seinen Traum zu verwirklichen.

Durch Bjerknæs' Arbeiten konnte er enge Beziehungen zu anderen Wissenschaftlern aufbauen, die ebenfalls mithilfe der Äthertheorie eine vereinheitlichte Beschreibung der Natur entwickeln wollten. Einer davon war William Thomson, Baron Kelvin of Largs (Abb. 2). Thomson wurde 1824 in Belfast geboren und zog 1832 nach Glasgow. Schon als Jugendlicher konnte er einen beeindruckenden Lebenslauf vorweisen. Im zarten Alter von 14 Jahren besuchte er Kurse an der University of Glasgow, mit erst 17 Jahren studierte er an der University of Cambridge. Nachdem er sein Studium dort abgeschlossen hatte, verbrachte er ein Jahr in Paris, wo er sich zusammen mit den herausragendsten Mathematikern und Physikern der Zeit ganz der Forschung widmete. Thomson setzte seine Karriere in Glasgow fort. Dort trat er im Alter von 22 Jahren eine volle Professur in Naturphilosophie (heutige Physikprofessur) an. Er war zwar vor allem ein hochkarätiger Theoretiker, besaß aber auch erstaunliche praktische Fähigkeiten, mit deren Hilfe er den Grundstein seines beachtlichen Wohlstands legte. Und so widmete er einen Teil seiner Zeit der theoretischen Physik und den anderen nutzte er, um dank seiner Fachkenntnis in Telegrafie Geld zu verdienen: Er meldete ein Patent auf einen Empfänger an, der später in allen britischen Telegrafennetzen



**Abb. 2** Sir William Thomson, später Lord Kelvin (1824–1907), mit 22 Jahren bereits ein bedeutender Professor, spielte in der Wissenschaft bis zum Ende seines Lebens eine herausragende Rolle. Er veröffentlichte mehr als 600 Artikel und verstarb während seiner dritten Amtszeit als Präsident der Royal Society of Edinburgh. Mit den Transatlantikkablen verdiente er ein Vermögen: Er kaufte eine 126t schwere Yacht, die *Lalla Rookh*, sowie ein Haus an der schottischen Küste in Largs. Er ist in der Westminster Abbey neben Sir Isaac Newton bestattet

zum Standard wurde. Im Jahr 1866 wurde Thomson für seine Arbeit an den Transatlantik-kabeln, die eine Kommunikation zwischen Europa und den Vereinigten Staaten und auch bald zwischen anderen Ländern der Welt möglich machten, zum Ritter geschlagen. Diese Leitung erleichterte auch die Kommunikation zwischen Wetterbeobachtern erheblich. In den Vereinigten Staaten wurde Thomsen Vizepräsident der Kodak Company, und zu Hause wurde seine Leistung ein weiteres Mal – diesmal mit Erhebung in den Adelsstand – geehrt, wobei er den Titel Lord Kelvin erhielt.

Kelvin (der Name, unter dem er heute bekannt ist) war also reich und hatte hohe Ämter inne. Er war einer der Ersten, der sowohl in der akademischen Laufbahn als auch in der Industrie immensen Erfolg vorweisen konnte. Aber mit dem Herzen war er zweifellos ganz Wissenschaftler. Sein Beitrag zur theoretischen Physik war enorm. Kelvin spielte eine entscheidende Rolle bei der Erklärung von Wärme als Energieform und vertrat er die für die damalige Zeit fundamental abweichende und abstrakte Sichtweise, dass Energie und nicht Kraft den Kern der Newton'schen Mechanik ausmacht. Tatsächlich entwickelte sich letztendlich die Energie zum zentralen Punkt der Naturwissenschaften. Er war auch ein enthusiastischer Unterstützer des Ätherkonzepts, wobei seine Überlegungen viel weitreichender waren als die vieler seiner Kollegen.

Während er die Grundgleichungen der Hydromechanik untersuchte – Newtons Gesetze angewendet auf die Bewegung von Feststoffen und Gasen –, weckte ein Ergebnis, das Herrmann von Helmholtz 1858 veröffentlicht hatte, Kelvins besonderes Interesse. In seiner Analyse von Fluidbewegungen konzipierte Helmholtz die Idee einer „idealen Flüssigkeit“: ein Feststoff oder ein Gas, von dem man bestimmte Eigenschaften annehmen konnte. Der Ausdruck „ideal“ verweist auf die Vorstellung, dass die Flüssigkeit ohne jeden Widerstand bzw. ohne jede Reibung fließt und so keine Energie in Wärme oder etwas Ähnliches umgewandelt wird. Auch wenn ein solches Konzept künstlich, wie das Produkt eines weltfremden Akademikers erscheint, brachte Helmholtz' Analyse der Bewegungen idealer Flüssigkeiten etwas sehr Bemerkenswertes zum Vorschein. Statt die Bewegung der Strömung bezüglich Geschwindigkeit und Richtung zu analysieren, untersuchte er eine Gleichung für die Änderung der Wirbelstärke des Fluids, die von einem „perfekten Wirbel“ ausgelöst wird – einer rotierenden Strömung, wie ein in einer Tasse Kaffee, die gleichmäßig umgerührt wird. Zu seinem Erstaunen zeigten diese Gleichungen, dass eine Flüssigkeit, die zu Beginn wirbelt, für immer weiter wirbeln wird. Im Umkehrschluss wird eine ideale Flüssigkeit, in der es keine Wirbel gibt, auch nicht spontan anfangen Wirbel zu bilden. Kelvin wollte diese Ideen auf den Äther übertragen und interpretieren. Er stellte sich den Äther als ideale Flüssigkeit vor und Materie zusammengesetzt aus „Wirbelatomen“, sodass die winzigen Wirbel im Äther die Bausteine von Materie darstellten. Im Jahr 1867 veröffentlichte er (unter dem Namen William Thomson) im Journal *The Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* einen elfseitigen Aufsatz mit dem Titel „On Vortex Atoms“ (Über Wirbelatome). Natürlich entstand die Frage, wie Wirbel, oder seine „idealisierten Wirbelatome“, überhaupt entstehen konnten, wo sie doch beständige Eigenschaften einer idealen Flüssigkeit waren. Um Kelvins Antwort würdigen zu können, sollten wir uns daran erinnern, dass Mitte des 19.

Jahrhunderts eine turbulente Zeit für Wissenschaft und Gesellschaft war; Darwin spaltete mit seinen Ideen der Evolution Philosophie und Religion, was auch eine Kluft zwischen Wissenschaft und Kirche zur Folge hatte. Der gläubige Presbyterianer Kelvin dachte, dass er die Fronten glätten könne, wenn er die Erschaffung der Wirbel als Gottes Werk erklären würde. Mit einigen sorgfältigen mathematischen Fakten einerseits und einer klaren Rolle Gottes andererseits, war er fest davon überzeugt, dass der Äther das Zentrum aller Materie und somit der gesamten Physik sei.

Wie auch schon sein Patent für transatlantische Telefongespräche zeigt, beruhte sein Interesse an der Äthertheorie nicht auf blauäugigen Spekulationen. Er übernahm Helmholtz' Theorie der Wirbelbewegung und formulierte sie neu – in Form eines Satzes, welcher zeigt, dass eine Größe, die die Stärke der Wirbelbewegung misst, zeitlich erhalten bleibt, auch wenn sich das Fluid verändert. Diese Größe wird Zirkulation genannt. Da die Zirkulation eine große Rolle beim Verständnis des Wetters spielt, werden wir sie in Kap. „3. Fortschritte und Missgeschicke“ ausführlicher diskutieren. Im Moment reicht es zu wissen, dass die Zirkulation eines idealen zirkulären Wirbels durch den Betrag der Geschwindigkeit des Wirbels multipliziert mit dem Umfang des Kreises, auf dem sich das Fluid bewegt, definiert ist.

Auch wenn sich die Äthertheorie letztendlich nicht durchsetzte, war Kelvins Intuition, sich auf die Zirkulation in einem Fluid zu konzentrieren, von großer Bedeutung. Der Satz von Kelvin ist ein wichtiger Bestandteil heutiger Universitätskurse über die Strömung ideale Flüssigkeiten. Bjerknes versuchte diese Ideen zu nutzen, um einige der experimentellen Ergebnisse zu erklären, die er kurz zuvor durchgeführt hatte. Er hatte untersucht, was passiert, wenn er zwei Sphären (Kugeloberflächen) innerhalb einer Flüssigkeit in Rotation versetzt. Abhängig von ihrer Relativbewegung zogen sich die Sphären aufgrund der Bewegung, die sie im Fluid erzeugen, entweder an oder stießen sich ab. Bjerknes analysierte seine Theorie und versuchte zu zeigen, wie seine Ergebnisse Kräfte erklären könnten, wie beispielsweise Magnetismus. Es dauerte nicht lange, bis er auf Schwierigkeiten stieß. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Helmholtz und Kelvin wiesen seine Experimente und Berechnungen darauf hin, dass Wirbel in einer idealen Flüssigkeit erzeugt werden konnten, wenn benachbarte Sphären in Rotation gebracht werden.

Eine Zeitlang beschäftigte Bjerknes dieses Rätsel: Kelvins Ergebnisse waren mathematisch fehlerfrei, wie konnten nun seine Ergebnisse, die er durch seine eigenen Experimente erhielt, falsch sein? In der Zwischenzeit hatte Bjerknes eine Stelle an der neuen schwedischen Hochschule in Stockholm erhalten, eine renommierte private Universität, an der bedeutende Forschung betrieben wurde. Vilhelms neue Position bot ihm viele Möglichkeiten, seinen Interessen nachzugehen. Eines Tages, zum Jahresanfang 1897, realisierte er auf seinem Spaziergang von der Hochschule nach Hause, dass Kelvins Theorie, obwohl korrekt, nicht auf sein Experiment (und Problem) angewendet werden konnte. Denn Kelvins Zirkulationssatz erlaubte gar nicht, dass sich Druck und Dichte innerhalb des Fluids unabhängig voneinander verändern können, wie sie es jedoch in der Atmosphäre tun. Solche Druck- und Dichteschwankungen in Bjerknes' Experiment würde die Anwendung des Satzes von

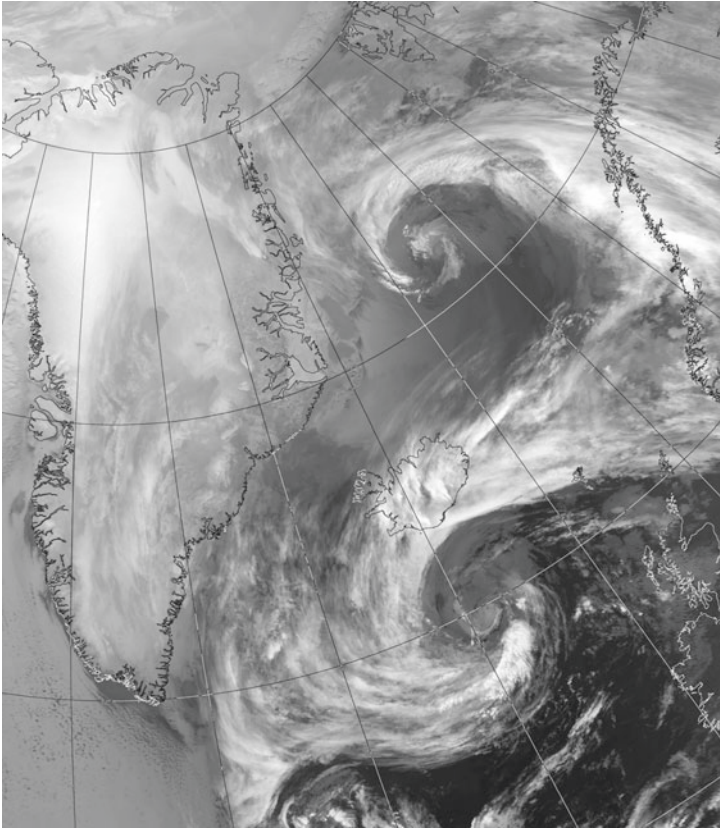


Kelvin außer Kraft setzen. Bjerknes versuchte umgehend Kelvins Theorie zu modifizieren, um unabhängige Veränderungen von Druck und Dichte zuzulassen. Ihm gelang es zu zeigen, wie Zirkulation auch in einer idealen Flüssigkeit erzeugt, verstärkt oder geschwächt werden kann. Diese Ergebnisse sind bekannt als Bjerknes'scher Zirkulationssatz.

Das war ein großer Durchbruch. Ende des 19. Jahrhunderts wussten die Mathematiker und Physiker nun schon seit fast 150 Jahren, wie sie Newtons Bewegungsgleichungen anwenden konnten, um die Dynamik von Fluiden zu studieren und zu quantifizieren. Das Problem bestand darin, dass diese Gleichungen, auch die einer idealen Flüssigkeit, schwer zu lösen waren. Bis in die späten 1880er-Jahre hinein wurden nur einige wenige, sehr spezielle und idealisierte Lösungen gefunden. Indem sie sich auf die Wirbelhaftigkeit und die Zirkulation statt auf Geschwindigkeit und Richtung der Fluidströmung konzentrierten, öffneten Helmholtz und Kelvin die Tür zur „Überschlagsrechnung“ (sehr einfachen Berechnungen), um auszuarbeiten, wie sich Wirbel – als allgegenwärtige Bestandteile von Fluiden – bewegen und verändern. Berechnungen, die sehr kompliziert werden würden, wenn wir die Geschwindigkeits- und Richtungsänderung aller Partikel der Strömung direkt aus den Bewegungsgleichungen herleiten müssten, waren nun auf einige relativ einfache Schritte reduziert.

Bjerknes baute diese Ideen zu einer neuen Theorie aus, die es ermöglichte, sich mit realistischeren Situationen zu befassen als die Arbeiten von Helmholtz und Kelvin. Insbesondere konnte mit ihrer Hilfe erforscht werden, wie sich Wirbel in der Atmosphäre und den Ozeanen verhalten, weil in diesen nahezu idealen Flüssigkeiten Druck, Temperatur und Dichte voneinander abhängen. So gelangen wir zu einer umfassenden Sicht, wie sich Wirbelstrukturen zeitlich verändern, ohne den außerordentlich komplizierten Versuch unternehmen zu müssen, die Bewegungsgleichungen für jedes Detail des gesamten Fluids zu lösen. Dies wiederum hilft uns, die Grundstruktur der Wirbel in Wettersystemen zu erklären, die oft sehr deutlich auf Satellitenbildern erkennbar sind (wie in Abb. 3 und Abb. II im Farbteil vor Kap. „Zwischenspiel: Ein Gordischer Knoten“ in Farbe dargestellt ist: Beide Aufnahmen zeigen ähnliche Wirbel des Golfstromes). Diese Beständigkeit großer Wirbel aus Luft und Wolken in der Atmosphäre ist ein Beispiel für den Satz von Kelvin, modifiziert für reale Temperatur- und Dichteveränderungen, so wie es Bjerknes vorschlug. Im Golfstrom bewirkt der Salzgehalt des Wassers Dichteveränderungen, was auf ähnliche Weise zu einer Veränderung des Wirbelverhaltens führt.

Bjerknes freute sich sehr über seinen Fortschritt und begann, seine Ergebnisse mit seinen Kollegen zu diskutieren. Zum Jahresende 1897 präsentierte er der Stockholmer Physikalischen Gesellschaft Verallgemeinerungen der Theorien von Helmholtz und Kelvins. Nun war ernsthaftes Interesse an seiner Arbeit geweckt. Doch es interessierten sich nicht nur die wenigen verbleibenden Anhänger der Äthertheorie, sondern Wissenschaftler aus ganz verschiedenen, wichtigen und aktuellen Bereichen der Physik. Svante Arrhenius, ein Mitglied der Physikalischen Gesellschaft, begeisterte sich für die Anwendung solcher Ideen aus der allgemeinen Physik auf Probleme, die besonders klar in der Atmosphären- und Ozeanforschung auftraten. Er war ein angesehener Chemiker und einer der ersten Wissenschaftler, der den Zusammenhang von Treibhauseffekt und Kohlenstoffdioxid diskutierte.



**Abb. 3** Eine Zyklone, bzw. ein Tiefdrucksystem, ist eine große rotierende Luftmasse mit einem Durchmesser von etwa 1000km, die sich durch unsere Atmosphäre bewegt und dabei das Wetter verändert. Zyklonen bringen oft Regen und stürmische Winde mit sich. Der Name Zyklone kommt aus dem Griechischen und lässt sich mit Zusammenrollen einer Schlange übersetzen. (© NEODAAS/University of Dundee)

Sowohl das vorhersagbare als auch das unvorhersagbare Verhalten von Ozean und Atmosphäre haben das wissenschaftliche Denken seit den Anfängen der Wissenschaft angeregt. Aber die ernsthafte Erforschung der Atmosphäre erwies sich als schwierig. Nur wenige, meist isoliert arbeitende Personen haben noch vor Ende des 19. Jahrhunderts dazu beigetragen, dieses Fachgebiet voranzubringen. Einer der Gründe dafür, dass es in der atmosphärischen Wissenschaften (im Vergleich zur Astronomie) im 18. und 19. Jahrhundert kaum Fortschritte gab, war die Widerspenstigkeit der Mathematik, die man für das Lösen der Gleichungen in der Hydrodynamik brauchte. Ende des 19. Jahrhunderts machten sich daher nur einige wenige Wissenschaftler die Mühe, über die Bewegung der Atmosphäre als ein Problem der mathematischen Physik nachzudenken. Es war einfach zu schwierig.

Der stockholmer Meteorologe Nils Ekholm, wurde ein enger Kollege von Bjerknes. Ekholm untersuchte die Entstehung von Zyklonen, das heißt von Wirbeln in der Luft, wie sie in Abb. 3 zu sehen sind (seit 1820 einer der meistdiskutierten Bereiche in der Meteorologie). Dabei zeigte er, wie Luftdruck und Luftdichte von Ort zu Ort variieren. Aber als er anfang, mit Bjerknes über seine Arbeit zu diskutieren, fehlte ihm eine Methode, mit der er seine Beobachtung mit einer Theorie der Dynamik verknüpfen konnte. Ekholm interessierte sich auch für das Ballonfahren. Aber um einen Heißluftballon in der Höhe zu navigieren, ist es notwendig, das Wetter in einer bestimmten Höhe abzuschätzen. Zu dieser Zeit wusste man allerdings nur wenig über den Aufbau der Atmosphäre in unterschiedlichen Höhen (zum Beispiel, wie sich die Temperatur mit der Höhe verändert), umso größer war das Interesse daran, die Wissenslücken zu füllen.

Heißluftballons spielten bei vielen furchtlosen Abenteuern eine große Rolle (Abb. 4). So stellten die Norweger und Schweden einen beeindruckenden Rekord in der Polarerkundung auf. Der berühmte skandinavische Forscher Fridtjof Nansen zog die Aufmerksamkeit der ganzen Welt auf sich, als er Anfang der 1890er-Jahre mit dem Schiff um das Polarmeer nach Nordrussland und Sibirien reiste. So entstand 1894 die Idee, den Nordpol mit einem Ballon zu erreichen. Bis zum Versuch im Juli 1897 vergingen drei Jahre mit der Planung und der Suche nach finanzieller Unterstützung. Letzteres kam unter anderem vom König von Schweden und von Alfred Nobel (dem Stifter des Nobelpreises). Ekholm war an der Vorbereitung und der Wettervorhersage beteiligt, aber er ging nicht mit auf Fahrt. Das war sein Glück, denn der Ballon samt dreiköpfiger Besatzung verschwand (Abb. 5). Dieser tragische Verlust war ein schwerer Schlag für den skandinavischen Nationalstolz. Eine Rettungsmission sollte gestartet werden. Aber niemand wusste, wo man zu suchen anfangen sollte. Da man damals nur wenig darüber wusste, wie sich der Wind in der Höhe verhält, konnte man nur raten.

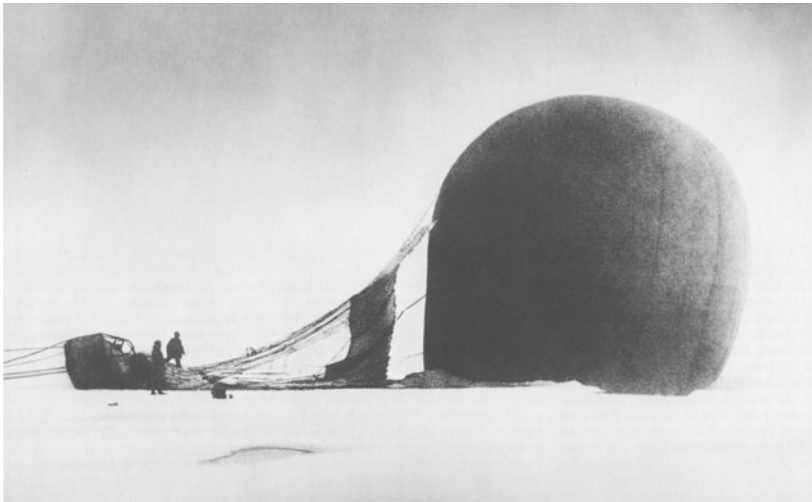
Im Jahr 1897 musste Ekholm in Bjerknes' Vorlesung einen „Heureka!-Moment“ gehabt haben, denn dabei wurde ihm klar, dass man, wenn man Druck- und Windgeschwindigkeitsmessungen am Boden kannte, mithilfe des Zirkulationssatzes Informationen über Wind und Temperatur in der oberen Atmosphäre bestimmen konnte und damit vielleicht auch die Mannschaft des verschollenen Heißluftballons retten. Ekholm hatte verstanden, dass Bjerknes' Satz die Zirkulation von den gesamten rotierenden Luftmassen wie beispielsweise Zyklonen oder Antizyklonen erklärte. Weil der Zirkulationssatz auf einer Formel basiert, die die Verstärkung oder Abschwächung der Zirkulation mit unterschiedlichen Druck und Dichtestrukturen in Zusammenhang bringt, kann mit ihm die Struktur von Zyklonen abgeschätzt werden. Demnach können uns Beobachtungen eines kleinen Teils einer solchen Luftmasse – beispielsweise der Luft nahe am Boden – verraten, wie sich die Luft in Regionen bewegt, die wir nicht direkt beobachten können (vorausgesetzt, der Zirkulationssatz kann auf die Luftbewegung angewendet werden). Ekholm diskutierte die möglichen Anwendungen des Zirkulationssatzes umgehend mit Bjerknes. Aufgrund dieser Gespräche wechselte Bjerknes seine Forschungsrichtung, er wandte sich von der zum Scheitern verurteilten Äthertheorien ab, hin zur meteorologischen Wissenschaft, was nicht nur Bjerknes' Berufsweg, sondern auch die moderne Meteorologie veränderte. Im frühen 20. Jahrhundert entwickelte sich



**Abb. 4** Um die obere Atmosphäre zu untersuchen, unternahm der britische Meteorologe James Glaisher mehrere Fahrten mit dem Heißluftballon. Während eines Aufstieges im Jahr 1862 erreichte er zusammen mit seinem Piloten eine Höhe von 10.000 m, wobei sie beinahe ihr Leben verloren. Die eiskalten Temperaturen und die verhedderten Seile zwischen Ballon und Korb ermöglichten es kaum, das Steuerventil des Ballons zu bedienen. Sie stiegen schnell auf, und Glaisher verlor in der dünnen Luft sein Bewusstsein. Coxwell litt an Erfrierungen und konnte seine Hände nicht mehr bewegen, um an der Leine zu ziehen und das Ventil zu entriegeln. Schließlich schaffte er es, aus dem Korb in die Seile zu klettern, die Leine zwischen seine Zähne zu nehmen und das Ventil zu öffnen. Der Ballon begann zu sinken und Glaisher kam wieder zu Bewusstsein. Nachdem sie sicher gelandet waren, musste Glaisher 11 km laufen, bis er schließlich Hilfe für die Bergung des Ballons und ihrer Ausrüstung fand

die Luftfahrt sehr schnell weiter, von den Heißluftballons und Luftschiffen hin zu Doppeldeckern. Methoden, die auf Bjerknes' Ideen als Grundlage haben, ermöglichten es, die Luftströmungen in der unteren, mittleren und oberen Atmosphäre zu verstehen.

Im Februar 1898 hielt Bjerknes einen weiteren Vortrag vor der Stockholmer Physikalischen Gesellschaft, in dem er Ideen vorstellte, wie man mit dem Zirkulationssatz Ekholms Vermutungen über die Entwicklung von Luftströmungen in Zyklonen testen könnte. Darin schlug er vor, durch Messinstrumente in Ballons und Drachen Winde und Temperaturen in



**Abb. 5** Solomon Andrée und Knut Fraenkel mit ihrem abgestürzten Ballon auf Packeis, aufgenommen im Jahr 1897 von dem dritten Mitglied des Teams, Nils Stindberg. Dieses Bild entstammt einem Film, der 1930 wiederentdeckt wurde – lange nachdem die Besatzung ums Leben gekommen ist

der Höhe zu vermessen. So könnte man mithilfe seiner Theorie alle Debatten um den Aufbau von Zyklonen endgültig beenden. Er zeigte weiter, dass diese Theorie genutzt werden könnte, um die Suchmannschaft für den sieben Monaten zuvor verschwundenen Ballon zu leiten. Sein Vortrag entfachte Begeisterung. Die Physikalische Gesellschaft stellte Gelder für die Ballons und Drachen bereit, um Bjerknes' Vorschlag zu realisieren. Man gründete ein Komitee, das die Konstruktion von „Drachen und fliegenden Maschinen, angetrieben durch elektrische Motoren“, welche die von Bjerknes geforderten Daten sammeln sollten, planen und überwachte. Bjerknes' langjähriger Kollege Arrhenius wollte in seinem Buch über die neueste Entwicklung in „kosmischer Physik“, an dem er gerade schrieb, über die Zirkulationstheorie berichten.

Es schien, als könnte es für Bjerknes eigentlich nicht mehr besser laufen. Aber es ging doch noch besser. Ein früher Unterstützer und Nutznießer seiner Ideen war ein Chemieprofessor aus Stockholm, Otto Pettersen. Pettersen interessierte sich für Ozeanografie und untersuchte die Salzgehalte und Temperaturen, die in Ozeanen gemessen wurden. Er erkannte die neuen Möglichkeiten für den „Technologietransfer“ zwischen etablierter Physik und Meteorologie, die Bjerknes' Ideen boten, und so entstand die nächste Anwendung des Satzes aus den Schwund von Fischbeständen. Pettersen hatte Bestandsaufnahmen in den Gewässern vor der schwedischen Küste untersucht. Diese wurden in den 1870er-Jahren nach der unerwarteten Rückkehr von Heringschwärmen ins Leben gerufen, die fast siebenzig Jahre lang verschwunden gewesen waren. Das Verschwinden der Fische aus diesem Gebiet hatte ganze Gemeinden in den wirtschaftlichen Ruin getrieben. Niemand wusste, warum

oder wohin die Fische verschwunden waren. Pettersens Studien zeigten, dass das Wasser in diesem Gebiet einen relativ hohen Salzgehalt und eine hohe Temperatur hatte und dass der Hering genau solchen Strömungen folgte. Bei geringeren Wassertemperaturen und niedrigerem Salzgehalt verschwanden die Fische jedoch. Also kam die Frage auf, ob es eine Möglichkeit gebe vorherzusagen, wann das passieren würde. Es stellte sich heraus, dass Bjerknæs' Zirkulationssatz helfen könnte, eine Antwort zu finden.

Ermutigt durch die Begeisterung für seine neuen Ideen hielt Vilhelm im Oktober 1898 einen dritten Vortrag vor der Stockholmer Physikalischen Gesellschaft. Er wies drauf hin, dass der Zirkulationssatz bei vielen Problemen angewendet werden kann, von erwärmter Luft in einem Schornstein über die Berechnungen der Verstärkung und Abschwächung von Zyklonen bis hin zur Vorhersage von Strömungen im Ozean. Aber inmitten seines neuen Erfolges musste Vilhelm auch einzusehen, dass seine ursprüngliche Absicht, nämlich die Arbeit seines Vaters, die Äthertheorie, in den Mittelpunkt der modernen theoretischen Physik zu rücken, nicht mehr haltbar war. Während ihm die Pioniere der modernen Meteorologie und Ozeanografie aufmerksam zuhörten, wandten sich die theoretischen Physiker langsam, aber sicher von der Äthertheorie ab. Die Jahrhundertwende leitete dann eine neue Ära ein: Relativitätstheorie und Quantenphysik revolutionierten unser Verständnis von Raum, Zeit und Materie, der Äther war nicht mehr notwendig.

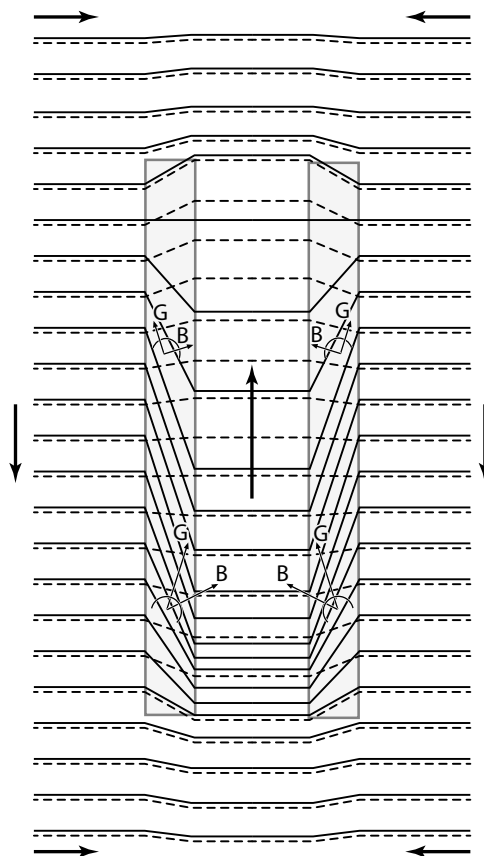
Vilhelm Bjerknæs' Leben war also an einem Scheideweg angekommen. Er musste erkennen, dass der intellektuelle Triumph seines Zirkulationssatzes wie ein Phoenix aus den Asche einer Idee aufgestiegen war, der sein Vater seine ganze Karriere gewidmet hatte. Und nun stand er der bitteren Realität gegenüber, dass das Lebenswerk seines Vaters dazu bestimmt war, in Vergessenheit zu geraten. Als Bjerknæs an jenem kalten Novemberabend 1898 den Flammen im Feuer zuschaute und dem Sturm lauschte, wurde er sich allmählich der Möglichkeiten bewusst, die er als Verfechter einer neuen Anwendung der Physik besaß: nicht die unsichtbaren, elementaren Naturkräfte in einem Ätherbild zu erklären, sondern das Wirken einer der sichtbarsten Kräfte – der des Wetters.

### ***Vertiefung 1.1 Die Zirkulation und der Seewind***

Bjerknæs hatte die Vision, mittelstarke Winde mithilfe von Druck- und Dichte- oder Temperaturmessungen vorhersagen können, auch wenn lokal auf komplizierte Weise viele verschiedene Windböen oder Wirbel verursacht werden können. An dieser Stelle erläutern wir die Mathematik seines Zirkulationssatzes, wenn er auf die Entstehung eines auflandigen Windes nahe einer durch die Sonne erwärmten Küste angewendet wird.

Die Zirkulation ist durch das Weg- oder Randintegral  $C = \int \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}$  definiert. Dabei bezeichnen  $\mathbf{v}$  den Windvektor und  $d\mathbf{l}$  ein kleines Wegstück entlang des Weges. Typischerweise beginnt ein solcher Weg über dem Meer und erstreckt sich über eine Distanz von ca. 30 km über die Küste und das Land hinaus, wo er dann in die obere

**Abb. 6** Reproduktion von Abbildung 7 aus Bjerknes' Aufsatz aus dem Jahr 1898. Warme Luft strömt in einem Kamin nach oben. Vertiefung 1.1 erklärt die Konzepte bezüglich Wärme, Dichte und Druck, die Teil dieser Skizze sind. Bjerknes' Vorstellungsvermögen reichte von erwärmter Luft, die den Kamin hinaufströmt, bis hin zu Winterstürmen. Neu gezeichnet nach *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84 (2003): 471–480. (© American Meteorological Society. Mit freundlicher Genehmigung der American Meteorological Society)



Atmosphäre zurückführt. Dieser Prozess wird durch die Pfeile in Abb. 7 angedeutet. Das Integral addiert die Gesamtkomponenten des Windes, der in die Richtung des Weges, bzw. der Kontur, weht. Dabei stellt für jedes Wegstück ( $d\mathbf{l}$ )  $\mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}$  die Wegkomponente des Windes multipliziert mit der Länge des Wegabschnittes dar.

Nach Kelvins einfacherer Version des Zirkulationssatzes ist die Änderungsrate der Zirkulation, die von einem Beobachter gemessen wird, der sich mit dem Fluid bewegt, gleich null. In Formeln:  $DC/Dt = 0$ , wobei die totale Ableitung  $DC/Dt$  die Änderungsrate einer Größe beschreibt, während sie sich mitbewegt. Bjerknes betrachtete auch  $DC/Dt \neq 0$ , d. h. die Fälle, in denen Zirkulation erzeugt oder vernichtet werden kann, wenn es, verursacht durch Dichte- oder Temperaturänderungen, keinen Ausgleich der Flächen konstanten Druckes oder Dichte in dem Fluid gibt.

Druckflächen in der Atmosphäre sind nahezu horizontal. Luftschichten unterschiedlicher Temperatur und Dichte drücken aufgrund ihres Gewichtes und der Erdgravitation

die unter ihnen liegenden Schichten zusammen. Daher ist die größte Komponente des Druckes auf diesen Effekt zurückzuführen. Bjerknes suchte in seinem Aufsatz 1898 nach Anwendungen, in denen Erwärmungen in der Atmosphäre die Dichte der Luft deutlich stärker verändern als den Druck. In Abb. 7 zeigen wir eine Darstellung aus Bjerknes' Aufsatz, in der die Sonne die Küstenebene stärker als den angrenzenden Ozean erwärmt. Da die Luft über der Küstenebene aufgrund ihrer Ausdehnung wärmer und somit ihre Dichte geringer ist, sinken die Flächen konstanter Dichte über dem Land (dargestellt durch die durchgezogenen Linien) ab. Die gestrichelten Linien geben Flächen konstanten Druckes an. Man erkennt, dass diese Flächen über der Küstenebene nun nicht mehr parallel zu den Flächen konstanter Dichte liegen.

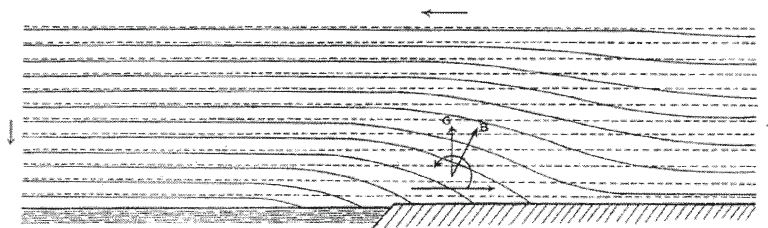
Bjerknes nutzte die in Abb. 7 mit  $\mathbf{G}$  und  $\mathbf{B}$  bezeichneten Vektoren für die Darstellung der totalen Ableitung der Zirkulation. Vektor  $B$  steht senkrecht auf der Dichtefläche, während Vektor  $G$  senkrecht zur Druckfläche steht (sie werden auch in Abb. 6 verwendet). Bjerknes hat gezeigt, dass  $DC/Dt = \int \int (\mathbf{G} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n} \, dA$  gilt, wobei  $\mathbf{n}$  den Einheitsvektor senkrecht zu der Ebene bezeichnet, in der das Flächenelement  $dA$  liegt. Dabei bezeichnet  $A$  die Fläche, die von der Kontur eingeschlossen ist. Das neue Integral ist die Summe der „Ausrichtungsfehler“  $\mathbf{G} \times \mathbf{B}$  innerhalb des Randweges. Wenn  $\mathbf{G}$  und  $\mathbf{B}$  auf einer Linie liegen, gilt  $\mathbf{G} \times \mathbf{B} = 0$ . Das bedeutet, dass  $DC/Dt = 0$  und damit Kelvins Zirkulationssatz gilt. Bjerknes begann einen Satz für den Fall zu formulieren, in dem  $\mathbf{G}$  und  $\mathbf{B}$  nicht auf einer Linie liegen. Da auflandiger Wind weht, wird in diesem Fall Zirkulation erzeugt.

Trotz der vielen kleinen Windböen und Wirbel in Küstenwinden bedeutet die Entstehung der gesamtheitlichen Zirkulation, dass ein gesamtheitlicher auflandiger Wind gebildet wird – die Meeresbrise. Bjerknes' Idee war folgende: Sobald die mit  $B$  und  $G$  bezeichneten Vektoren wie in Abb. 7 nicht mehr auf einer Linie liegen, erzeugen sie einen systematischen, mittleren Wind entlang des Weges, über den integriert wird. Auch wenn die genauen lokalen Winde nicht prognostiziert werden konnten, konnte der gesamtheitliche mittlere Wind entlang eines Küstenabschnittes vorhergesagt werden.

## Stürmische Gewässer

Gegen Ende des Jahres 1902 und zu Beginn des Jahres 1903 verursachten mehrere ungewöhnlich heftige Stürme Verwüstungen entlang der schwedischen Küste. Nicht zum ersten Mal in der Geschichte wurden Forderungen nach der Entwicklung eines Sturmwarnsystems laut. Ekholm nutzte die Gelegenheit und setzte sich für Messungen der Höhenluft mithilfe von Ballons und Drachen ein. Er plante, die Information aus diesen Beobachtungen zu nutzen, um empirische Regeln für die Sturmwarnungen zu formulieren. Wir können uns





**Abb. 7** Abbildung 9 in Bjerknes' Aufsatz aus dem Jahr 1898 zeigt einen idealisierten Seewind (während des Tages), der sich an der Küste bildet, mit dem Meer auf der linken Seite und dem (wärmeren) Land auf der rechten Seite. (Bulletin Am. Meteorol. Soc., April 2003, page 476, figure 7. ©American Meteorological Society. Abdruck freundlicher Genehmigung)

vorstellen, wie Bjerknes sich an den Kopf fasste, bestürzt darüber, dass es noch keinerlei physikalische Theorie gab, die Ekholms Ideen untermauern könnte.

Also begann Bjerknes einen „rationalen Zugang zur Wettervorhersage“ basierend auf den Gesetzen der Physik zu entwickeln. Im Jahr 1904 veröffentlichte er einen Aufsatz mit dem Titel „Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik“. Er entstand aus dem Bestreben, die Methoden zu rationalisieren: ausgehend von Vorhersagemethoden, die mithilfe von Erfahrungen entwickelt wurden, hin zu Regeln, die auf den Gesetzen der Physik beruhen. Auch wenn er zu dieser Zeit noch nicht ganz die Hoffnung aufgegeben hatte, die Physik der Äthertheorie weiterzuerfolgen, so hatte er sich inzwischen einen Namen gemacht als jemand, der physikalischer Prinzipien auf Fluide anwendete um Probleme zu lösen, die sich mit Strömungen in der Atmosphäre und den Ozeanen befassten.

In einer weiteren Vorlesung vor der Stockholmer Physikalischen Gesellschaft erklärte Bjerknes die Physik hinter dem Problem der Wettervorhersage und zog damit schnell die Aufmerksamkeit der Zeitungen auf sich. Bjerknes baute die Vorlesung zu einer Serie populärwissenschaftlicher Aufsätze aus. Aber wir müssen nicht unbedingt glauben, Bjerknes wollte das Wetter aus reiner Nächstenliebe vorhersagen. Seine Faszination für das Wetter zusammen mit der Tatsache, dass dieses Problem womöglich mithilfe der physikalischen Gesetze lösbar war, und genauer noch mit den Gesetzen der Mechanik, war wahrscheinlich seine wahre Motivation. Außerdem war er von Hertz beeinflusst, für den die Vorhersage das größte Ideal der Wissenschaft war, und daher war auch das Voraussagen des Wetters ein klares Ziel, das verfolgt werden sollte. Die Wissenschaft würde die Welt erklären.

Der Aufsatz aus dem Jahr 1904 wurde ein Klassiker, und er besaß zwei Besonderheiten. Die erste können wir von einem Klassiker erwarten: dass ein Meteorologe, der diesen Aufsatz mehr als 100 Jahre später liest, die Ideen des 42-jährigen Bjerknes sofort als solche erkennt, die hinter der modernen Wettervorhersage stehen. Heutzutage stehen den Meteorologen und Klimatologen Supercomputer, Satelliten und hochauflösende Bilder zur Verfügung – Innovationen, von denen man zu Bjerknes' Zeiten nicht einmal träumten konnte. Aber die Grundlagen dieser Neuerungen liegen in den bahnbrechenden Ideen des Aufsatzes aus dem

Jahre 1904 begründet. Die zweite bemerkenswerte Besonderheit dieses Aufsatzes, dessen Thema zu den ältesten wissenschaftlichen Forschungsgebieten gehört, besteht darin, dass er keine Einleitung besitzt und auch keinen Hinweis auf jemanden, der zuvor an diesem Problem gearbeitet hat. Aristoteles schrieb ein ganzes Buch über Meteorologie, welches sich über 1500 Jahre bewährt hatte. Und der französische Philosoph René Descartes betrachtete Meteorologie als Härtestest für seine Theorien, wie die Welt um uns herum verstanden, beobachtet und erklärt werden könnte, und widmete der Meteorologie ein wichtiges Kapitel.

Die Frage, warum Bjerknes' Ideen im Gegensatz zu den Vorstellungen von Aristoteles noch immer Bestand haben, ist eines der Hauptthemen in unserem Buch. Es könnte sein, dass Bjerknes auf jeglichen langatmigen Diskurs über die Geschichte der Wettervorhersage verzichtet hatte, weil diese Anfang des 20. Jahrhunderts noch immer etwas Obskures an sich hatte. Die verbreitetste Methode war, Beobachtungen aufzuzeichnen und daraus zu lernen. Diese Erfahrungen wurden dann von Meteorologen zu Meteorologen weitergereicht. Man verhielt sich engstirnig und abgeschottet. Bjerknes wusste, dass die Meteorologen die Grundgesetze der Physik geradezu mieden, und wollte etwas dagegen tun. Es würde ein halbes Jahrhundert dauern und die Entwicklung von Computern erforderlich machen, bis andere seine Vision der globalen Wettervorhersage realisieren konnten. Aber zunächst mussten die Grundlagen geschaffen werden.

Obwohl die Meteorologie über Jahrtausende hinweg eine wichtige Rolle für die Weiterentwicklung der Wissenschaften spielte, gab diese vor dem 20. Jahrhundert den Meteorologen nur wenig zurück. Im Laufe der Geschichte sind eine Handvoll nennenswerte und wichtige Beiträge zur atmosphärischen Wissenschaft zu finden, die auf den Grundgesetzen der Physik aufbauen. Aber nur wenige dieser Beiträge verbessern unsere Fähigkeit, das morgige Wetter vorherzusagen. Im Gegensatz zum Fortschritt der meteorologischen Wissenschaften per se, wurden tatsächlich erst 50 Jahre vor Bjerknes' unangefochtenem Aufsatz die ersten gezielten Bemühungen in Richtung Wettervorhersage unternommen. Aus mindestens zwei sehr guten Gründen hat das Jahr 1854 eine große Bedeutung für die Wettervorhersage. Der eine Grund ist der Krimkrieg. Er war zwar nach den Worten von Tennyson ein unverzeihliches militärisches Debakel, doch führte der Krieg immerhin zur Gründung des ersten nationalen Wetterdienstes in Europa. Die Initiative dazu entstand aus einer Katastrophe heraus. Am 13. November erlitten die französischen und britischen Flotten schwere Verluste und wurden durch einen Sturm über dem Schwarzen Meer nahezu vernichtet.

Die Flotte lag vor Anker und belagerte die Russen vor der Festung Sewastopol. Drohend tauchten am Horizont Vorzeichen eines Sturmes auf. Kurze Zeit später wüteten auf der Halbinsel Krim sintflutartige Regenfälle und Winde, so stark wie Hurrikane. Zu den Verlusten zählte ein medizinisches Versorgungsschiff (*HMS Prince*) mit 7000t Hilfsmittel für die gesundheitlich angeschlagenen verbündeten Truppen und das 100-Kanonen-Schlachtschiff *Henri IV*, der Stolz der französischen Flotte. Berichte über dieses Unglück beherrschten die Schlagzeilen, und die ungehaltene Öffentlichkeit forderte eine Erklärung.

Louis-Napoléon bat die besten Wissenschaftler der Welt um Hilfe. Ganz im Gegensatz zu den Vorhersagen der Astronomen, die mit beachtlicher Präzision und für viele Jahre im

Voraus Daten und Zeiten von Eklipsen und Ebbe und Flut voraussagten, schien im Jahr 1854 die Vorhersage von Stürmen noch unmöglich. Nachdem im Jahr 1846 zwei Mathematiker – der Brite John Couch Adams und der Franzose Urbain J. J. Le Verrier – unabhängig voneinander die Existenz eines neuen Planeten, einzig aus der Analyse von Beobachtungen anderer bekannter Planeten vorhersagten, hatte das Ansehen der Astronomen beträchtlich zugenommen; dabei hatten die beiden kein einziges Mal selbst in kalten Nächten durch das Teleskop gesehen.

In den frühen 1840er-Jahren verbrachte ein Professor der Astronomie, George Airy aus Cambridge, den Großteil seiner Zeit damit, die Umlaufbahn des relativ neu entdeckten Planeten Uranus zu erforschen. Sorgfältig beobachtete er den Orbit und verglich die Ergebnisse mit dem, was man nach Newtons Gravitationsgesetz erwarten würde. Nach und nach zeichneten sich zwischen den Beobachtungen und den vorhergesagten Umlaufbahnen Unterschiede ab. Eine Auseinandersetzung über die Ursache dieser Inkonsistenz zog sich über viele Jahre hin. Airy hinterfragte sogar die Gültigkeit von Newtons Gravitationstheorie, aber eine plausible Erklärung für die rätselhaften Irrwege des Uranus war die Existenz eines anderen, bisher unentdeckten Planeten, dessen Gravitationsfeld den Orbit des Uranus beeinflusste.

In Frankreich hatte sich auch Le Verrier (Abb. 8) – ein versierter Astronom mit einem schon bisher beneidenswerten Lebensweg – dazu entschlossen, die Herausforderung anzunehmen und die unbekannte Ursache für die Abwege des Uranus zu finden. Bis November 1845 hatte Le Verrier der Pariser Akademie der Wissenschaften vorgetragen, dass die Abweichungen mit Sicherheit durch die Anwesenheit eines anderen, bisher unbemerkten Planeten erklärt werden könnten und nicht aus Fehlern in Newtons Gesetzen oder in den Beobach-

**Abb. 8** Urbain J. J. Le Verrier (1811–1877) sagte mithilfe mathematischer Berechnungen die Existenz des Planeten Neptun voraus. Waren durch die Mathematik auch Stürme vorhersagbar? Le Verrier untersuchte die Wetterdaten vom Schwarzen Meer und folgerte, dass Stürme vorhersagbar seien, wenn man Beobachtungsdaten verwendete, die mit dem neuen elektrischen Telegrafen übertragen wurden. Lithografie von Auguste Bry



tungen selbst resultierten. Sieben Monate später, im Sommer 1846, hatte er die Position des unbekanntes Körpers berechnet. Aber es wollte niemand nach dem Planeten suchen.

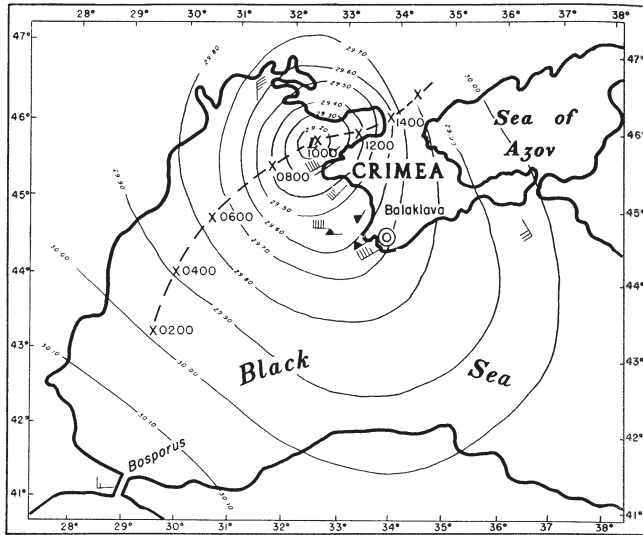
Vom Desinteresse seiner französischen Kollegen enttäuscht, schrieb Le Verrier an Johann Galle, einem Astronomen am Berliner Observatorium, folgenden Brief:

Ich suche einen ausdauernden Beobachter, der ein wenig Zeit entbehren möge, einen Bereich des Himmels zu untersuchen, wo es möglicherweise einen neuen Planeten zu entdecken gibt. Ich komme zu dieser Schlussfolgerung durch unsere Theorien des Uranus (...) Es ist unmöglich, die Beobachtungen des Uranus angemessen zu begründen, es sei denn, die Auswirkung eines neuen, bisher unbekanntes Planeten wird mit einbezogen (...) Richte dein Teleskop auf den Punkt auf der Ekliptik in der Konstellation des Aquarius, im Längengrad 326, und du wirst innerhalb eines Grades dieses Ortes einen neuen Planeten entdecken.

Galle bat den Direktor des Berliner Observatoriums nach etwas Beobachtungszeit am Teleskop, um den Hinweisen nachgehen zu können. Glücklicherweise war es der Geburtstag des Direktors, der daher etwas anderes vorhatte und das Teleskop noch für den gleichen Abend freigab. Galle wappnete sich für eine mühselige Arbeit, die darin bestand, das Messinstrument auf einen bestimmten Ort am Himmel zu richten und jedes Objekt mit einer Karte zu vergleichen, welche die Positionen der bereits bekannten Sterne zeigte. Binnen einer Stunde stieß Galle auf ein Objekt, das nicht auf der Karte verzeichnet war. Er prüfte in der folgende Nacht, ob es sich gegen den Hintergrund der bekannten „festen Sterne“ bewegt hatte – und das war tatsächlich der Fall. Der neue Planet Neptun lag weniger als ein Grad von Le Verriers Vorhersage entfernt. Das war ein Triumph für Newtons Physik und für die mathematischen Berechnungen: die Vorhersage der Position eines bisher unentdeckten Planeten, fast 4,5 Mrd. km von der Sonne entfernt. Es war ein Geniestreich für Le Verrier, dessen Ansehen beträchtlich zunahm.

Wenn Astronomen aus Beobachtungen die Existenz von Planeten berechnen können, dann – so muss Louis-Napoléon gedacht haben – sollten Meteorologen in der Lage sein, das Aufziehen von Stürmen zu berechnen. Er wandte sich an den neuen Superstar der Astronomie, um einen Rat drüber einzuholen, ob der Sturm über dem Schwarzen Meer vorhersagbar gewesen wäre. Le Verrier, der inzwischen gute Verbindungen zu Wissenschaftlern an vielen Observatorien hatte, holte für den Zeitraum vom 10. bis 16. November 1854 Wetterberichte aus ganz Europa ein. Er analysierte die Daten (Abb. 9) mit seinen Kollegen und folgerte, dass die Zugbahn des Sturmes vorhersagbar gewesen wäre, wenn man die Beobachtungen rechtzeitig an Meteorologen weitergegeben hätte.

Diese Ergebnisse führten schnell zu der Forderung, ein Netzwerk von Wetterstationen aufzubauen und diese mithilfe der neuen elektronischen Telegrafentechnologie direkt mit Meteorologen zu verbinden. Es sollten an unterschiedlichen Orten und in regelmäßigen Intervallen mit Barometern der Luftdruck und Windgeschwindigkeiten und -richtungen mit Windmessern (Anemometern) und Wetterfahnen gemessen, und diese Daten dann per Telegraf zu Vorhersagediensten übertragen werden. Die Meteorologen konnten sich so ein aktuelles Bild der Wetterlagen in einem ausgedehnten Gebiet machen. Die Beobachtungen



**Abb. 9** Die Abbildung zeigt die synoptische Karte, die Le Verrier für seine Analyse des Sturmes über dem Schwarzen Meer verwendete. Die Isobaren (Linien konstanten Druckes) auf Meereshöhe sind zusammen mit der Sturmzugbahn (die gestrichelte Linie, die von Mitte links bis oben rechts verläuft) dargestellt. Die eng beieinanderliegenden Isobaren nahe der Halbinsel Krim weisen auf sturmartige Winde in diesem Gebiet hin. Die nahezu runde Form beschreibt eine ideale Zyklone oder ein Tiefdrucksystem in den mittleren Breiten. Le Verrier wies darauf hin, dass die Konstruktion dieser Druckkarten ermöglichen würde, zukünftige Bewegungen solcher Stürme vorherzusagen. *Bulletin Am. Meteorol. Soc.*, Vol 61, Dec 1980. (© American Meteorological Society. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

des vorherrschenden Windes ermöglichten es den Meteorologen jeden Tag vorherzusagen, wohin sich die Wettersysteme bewegten. Windgeschwindigkeit und Luftdruck bestimmten die Intensität der Gegebenheiten. Diese Ideen und Methoden breiteten sich schnell in ganz Europa und Nordamerika aus. Und so begann die vielleicht größte internationale Zusammenarbeit in der Wissenschaft: der freie Austausch atmosphärischer Daten zur Wettervorhersage.

Der zweite Grund, warum das Jahr 1854 in der Geschichte der Wettervorhersage ein besonderes Jahr war, ist die Entstehung des „Meteorological Board of Trade“ in Großbritannien. Der Leiter dieses neuen Instituts war Vizeadmiral Robert FitzRoy (Abb. 10), der später den Titel des ersten nationalen Meteorologen erhielt.

Das Board of Trade wurde geschaffen, um ein neues Abkommen durchzusetzen, auf das man sich im Vorjahr auf der internationalen Konferenz zu maritimer Meteorologie in Brüssel verständigt hatte. Auf dieser Konferenz wurde vereinbart, dass alle meteorologischen Beobachtungen auf Flotten und Handelsschiffen vereinheitlicht werden sollten. Man folgte dem Ratschlag der Royal Society of London, und FitzRoy wurde zum meteorologischen Statistiker ernannt.

**Abb. 10** Robert FitzRoy (1805–1865) erkannte, dass die Sturmzugbahn, die im Jahr 1859 das neue, aus Eisen gebaute Schiff, die *Royal Charter*, zerstört und vielen Menschen das Leben gekostet hatte, vorhersagbar war. Er baute Sturmwarnsysteme in den großen englischen Häfen auf, die Schiffe vor Schaden bewahrten und vielen Seefahrern das Leben retteten. Fotografischer Abzug einer Lithografie von Herman John Schmidt, Auckland, ca. 1910. (Quelle: Alexander Turnbull Library, Wellington, Neuseeland)



FitzRoy hatte während seiner Jahre bei der Navy einen Einblick in die Meteorologie gewonnen. Bereits 1831 hatte er seinen aktiven Dienst mit Wissenschaft kombiniert, als er Mannschaftskapitän der HMS *Beagle* war und den jungen Naturwissenschaftler Charles Darwin ausgewählt hatte, die Forschungsexpedition der *Beagle* nach Südamerika zu begleiten. Darwin schien einige Zeit damit verbracht zu haben, seinen Kapitän zu studieren, da FitzRoy dem Ruf nach ein hitziges Gemüt hatte (sein Spitzname war „Heißer Kaffee“). Im Jahr 1841 begann FitzRoy eine vielversprechende Karriere in der Politik und wurde schließlich zu einem Mitglied des Parlaments für Durham gewählt. Aber als er 1843 einen Posten als Gouverneur von Neuseeland annahm, brachte ihn sein aufbrausendes Temperament schon nach kurzer Zeit in Schwierigkeiten. Nach nur wenigen Monaten in seinem neuen Amt zerstritt er sich gleichzeitig mit den Maori und weißen Siedlern, als er versuchte, einen Konflikt über Landrechte zu lösen. Nachdem er nach London zurückgerufen worden war, kehrte er zu seinen Aufgaben bei der Marine zurück und zog sich schließlich im Jahr 1850 aus dem aktiven Dienst zurück.

Während seines Ruhestandes lernte FitzRoy die Arbeit von M. F. Maury kennen, die ihn gleichermaßen beeindruckte und inspirierte. Im Jahr 1853 veröffentlichte Maury, ein Leutnant der U.S. Navy, das Buch *Physical Geography of the Sea*. Dabei handelt es sich um die Beschreibung von Strömungen (insbesondere des Golfstromes), von Schwankungen des Salzgehaltes und von der Tiefe der Ozeane. Sogar das atmosphärische Ozon wird erwähnt, dessen systematische Beobachtungen gerade erst begonnen hatten, sowie die Beziehung zwischen Ozon und Windrichtung.

Diese Arbeit entstand aus über viele Jahre zusammengetragenen meteorologischen und ozeanografischen Beobachtungen. Maury nutzte diese Informationen zum Guten, denn seine