

Meteorologische Untersuchungen im 19. Jahrhundert

– Die Methode der Beobachtung im Gefüge des Erkenntnisprozesses der Physik –

Simon F. Kraus

Universität Siegen, Didaktik der Physik, Adolf-Reichwein-Str. 2, 57068 Siegen,
kraus@physik.uni-siegen.de

(Eingegangen: 01.10.2018; Angenommen: 12.03.2019)

Kurzfassung

Die älteste – weil zunächst von instrumentellen Voraussetzungen unabhängige – Methode der Naturerschließung ist die systematische Beobachtung. Im Zuge der Herausbildung einzelner naturwissenschaftlicher Disziplinen, wie der Physik, wurde sie jedoch nicht verdrängt, sondern findet sich nach wie vor, z. B. als Teil des Experiments, wieder. Ebenso ist die Beobachtung auch weiterhin als eigenständige Form der Erkenntnisgewinnung anzutreffen, etwa innerhalb der Astrophysik oder auch in Teilgebieten, deren Untersuchungsgegenstände zwar prinzipiell zugänglich, jedoch nicht auf Labormaßstab skalierbar sind, wie etwa der Atmosphärenphysik. In diesem Beitrag soll anhand eines historischen Beispiels aufgezeigt werden, wie der Prozess der Theoriebildung seinen Ausgangspunkt in Beobachtungsdaten haben konnte, ohne dass auf das Experiment zurückgegriffen wurde. Hierbei wird als Werkzeug zur Strukturierung und Visualisierung der historischen Abläufe der EJASE-Prozess Einsteins herangezogen.

Dabei wird gezeigt, wie sich beobachtungsbasierte Theoriebildung unter äußeren Einflüssen, wie der natürlichen und technischen Umgebung oder persönlicher Voraussetzungen, vollzieht.

Abstract

The oldest method for the inquiry of nature is systematic observation – since it initially was independent of instrumental requirements. In the course of the development of individual scientific disciplines, such as physics, systematic observation was not discarded, it is still to be found, e.g. as part of an experiment. Likewise, observation can still be found as an independent form of knowledge acquisition, for example in astrophysics as well as in some of its sub-areas, such as atmospheric physics for example, whose objects of investigation are accessible in principle but cannot be scaled down to the scale of a laboratory. In this article, a historical example illustrates how the process of theory formation had its starting point in observational data, without recourse to the experiment. Einstein's EJASE process serves as a tool for structuring and visualizing historical processes.

The article shows how observation-based theory builds up under external influence, like the natural and technical environment or personal prerequisites.

1. Motivation

Auf die Frage nach den wesentlichen Erkenntnismethoden der Physik lautet die Antwort meist, dass sich diese Wissenschaft auf Messungen, Experimente und Beobachtungen stützt (Tipler, 2015, S. 4; Demtröder, 2013, S. 4). Ob jedoch die Naturbeobachtung dabei neben dem Experiment eine gleichrangige Methode ist oder hinter diesem zurücksteht, bleibt unklar. Ebenso ist grundsätzlich fraglich, wie überhaupt ein Erkenntnisfortschritt, d. h. eine Weiterentwicklung von Theorien und Modellen zu erzielen ist, wenn das Untersuchungsobjekt unzugänglich bleibt. Oft wird an dieser Stelle auf die Erfolge der Astrophysik verwiesen, die sich ebenfalls mit dieser Einschränkung konfrontiert sieht (Anderl, 2017, S. 13f.). Es existieren jedoch auch in den aktuellen

Forschungsgebieten der Physik Beispiele für Untersuchungen, die zunächst ausschließlich anhand von Beobachtungen angestellt werden konnten. Genannt seien beispielhaft die Untersuchung von leuchtenden Nachtwolken und ihrer Entstehungsprozessen (Thomas, 1989). Es erscheint daher lohnenswert, die Methode der Beobachtung aus erkenntnistheoretischer Sicht zu analysieren und dabei auf historische Entwicklungen zurückzugreifen.

Ein solches Beispiel für beobachtungsgestützte Forschung stellen die Untersuchungen über die Natur der nordatlantischen Stürme dar, die man verstärkt ab den 1830er Jahren durchführte. Im Zentrum des vorliegenden Beitrages steht dabei William Redfields Theorie, die zwar aus der modernen Perspektive bei weitem keine vollständige Erklärung bietet,

jedoch wertvolle Einblicke in das Zustandekommen einer Theorie auf Basis von Beobachtungsdaten erlaubt. Von großem Vorteil für eine mögliche schulpraktische Aufarbeitung ist hier, dass die Quellenlage im Hinblick auf die Verfügbarkeit und Lesbarkeit ausgesprochen gut ist und gleichzeitig der fachliche Anspruch auf einem Niveau bleibt, der eine ausführliche Behandlung des Themas im Schulunterricht problemlos ermöglicht.

Um den Erkenntnisprozess im Ganzen systematisch zu beschreiben und dabei die Wirkung von Beobachtungsdaten einbinden zu können, wird auf den EJASE-Prozess Einsteins zurückgegriffen. Dieser bietet den Vorteil, dass er zwar übersichtlich und leicht nachvollziehbar bleibt, jedoch gleichzeitig auch außerwissenschaftliche Einflüsse auf die Theoriebildung, wie die persönlichen Überzeugungen der beteiligten Wissenschaftlicher, problemlos zu integrieren vermag.

2. Der EJASE-Prozess als ein Modell der Erkenntnisgewinnung

Um die Beziehung zwischen Sinneseindrücken und dem System der naturwissenschaftlichen Theorien darstellen zu können, ist ein geeignetes Modell wünschenswert, das den Prozess der Erkenntnisgewinnung der Physik (oder der Naturwissenschaften im Allgemeinen) in einer zugänglichen Form darstellt.

Für den vorliegenden Beitrag soll der sogenannte EJASE-Prozess nach Albert Einstein (1879-1955) Verwendung finden, den dieser im Jahre 1952 in einem Brief an Maurice Solovine (1875-1958) niederschrieb (Einstein, 1960, S. 120). Zentrales Element des kurzen Briefes ist die in Abbildung 1 wiedergegebene Skizze, die aus vier Hauptelementen besteht:

- Die Ebene (E), die die „Mannigfaltigkeit der unterschiedlichen (Sinnes-) Erlebnisse“ darstellt,
- einer geschwungenen Kurve (im Weiteren als Jump (J) bezeichnet),
- dem System der Axiome (A) und
- den gefolgerten Sätzen (S, S', S'').

Auf diese Elemente soll nun im Einzelnen eingegangen werden. Die Ausführungen folgen dabei dem Wissenschaftshistoriker Gerald Holton, dem die Aufarbeitung und Erweiterung des Modells zuzuschreiben ist (Holton, 1979). Ein erster Versuch, das Modell auch für die Didaktik nutzbar zu machen, geht auf Wilfried Kuhn zurück (Kuhn, 1983).

Es sei vorab angemerkt, dass der gesamte Zyklus i. d. R. nicht von einem Wissenschaftler allein durchlaufen wird. Es handelt sich vielmehr um eine Reihe von Iterationen, die stückweise zum Aufstellen und zur Weiterentwicklung von Theorien sowie zu deren Prüfung von verschiedenen Personen oder Personengruppen über unterschiedlich lange Zeiträume hinweg durchlaufen wird. Dabei knüpft der Forscher jeweils an das bereits vorhandene Begriffs-

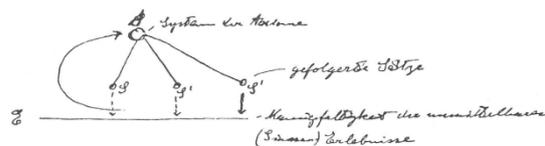


Abb. 1: Originalskizze Einsteins zum EJASE-Prozess (Quelle: Einstein, 1960)

und Axiomensystem an oder ersetzt dieses durch ein neues Begriffssystem.

2.1. Die Ebene der Sinneserlebnisse

Einstein bemerkt zu den Sinneserlebnissen schlicht, dass uns diese gegeben seien. Man muss sich (E) als unendlich ausgedehnte Linie vorstellen, auf der sich die Gesamtheit aller möglichen Erfahrungstatsachen und Beobachtungen befindet. Dabei muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass Einstein den Begriff der Sinneserfahrungen sehr weit fasst: Für ihn waren etwa die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit oder auch die Äquivalenz von träger und schwerer Masse Sinneserfahrungen (Holton, 1979, S. 115). Im Rahmen des vorliegenden Beitrags ist eine derartig umfassende Vorstellung von Erfahrungstatsachen nicht notwendig. Es bleibt hier bei unmittelbaren Sinneserfahrungen bzw. solchen, die durch einfache Messinstrumente zugänglich sind.

Einstein liefert an anderer Stelle seine Vorstellung von der grundsätzlichen Aufgabe der Wissenschaft: „Wissenschaft ist der Versuch, die chaotische Vielfalt unserer Sinneserfahrungen in ein logisch einheitliches Gedankensystem einzubauen“ (Einstein, 1956).

Der EJASE-Prozess in der Fassung Einsteins ist jedoch (zumindest explizit) noch nicht fähig zu beschreiben, wie Ordnung in dieses Chaos gebracht werden kann.

2.2. Der Gedankensprung

Ein ganz wesentliches Element des Prozesses bleibt bei Einstein selbst ohne eigene Bezeichnung. Es handelt sich um den großen geschwungenen Pfeil, der die Ebene der Sinneserlebnisse mit dem System der Axiome verbindet. Holton bezeichnet ihn (aus dem englischen Original kommend) mit J(ump). Bei diesem gedanklichen Sprung, den der Wissenschaftler auf seiner Suche nach neuen Impulsen für die Weiterentwicklung von Theorien machen muss, handelt es sich um teils wilde Spekulationen, Vermutungen, plötzliche Inspirationen, leise Ahnungen oder eine Art von Vorgefühl. Sie mögen durchaus auch einer verzweifelten Suche entspringen. Es handelt sich bei diesen Umschreibungen allesamt um Begriffe, die klassischerweise sicherlich nicht mit einem naturwissenschaftlichen Vorgehen in Verbindung gebracht werden dürften (Holton, 1979, S. 116).

Für Einstein ist es ein zentrales Anliegen, darauf hinzuweisen, dass eben kein logischer Weg von den

Erfahrungen (E) zu den Axiomen (A) führt. Auch ist anzumerken, dass Begriffe – die mit den Axiomen hier auf einer Ebene stehen und die Basis jeder Theorie bilden – nicht identisch mit den Sinnesempfindungen sind. Es handelt sich vielmehr um eine Art von Generalisierungen und Abstrahierungen, die zwar mit den „Observablen verbunden“ (Holton, 1979, S. 120), jedoch nicht direkt aus diesen ableitbar sind. Hierzu wiederum Einstein:

„Zu diesen elementaren Gesetzen führt kein logischer Weg, sondern nur die auf Einfühlung sich stützende Intuition“ (Einstein, 2005, S. 143).

2.3. Sätze und Vorhersagen

Aus den (neuen oder modifizierten) Axiomen und Begriffen werden rein deduktiv Sätze und damit schließlich Vorhersagen abgeleitet. Dabei handelt es sich um einen rein logischen Prozess. Hierzu bemerkt Einstein:

„Die Ratio gibt den Aufbau des Systems“ (Einstein, 2005, S. 151). In den theoretischen Bereich des EJASE-Prozesses sind die Beobachtungen bereits auf indirektem Wege eingeflossen, weshalb er im Folgenden nicht weiter berücksichtigt und als „Theorierteil“ bezeichnet wird. Gleichzeitig wird sich die Theorie jedoch noch als ein Element von entscheidender Bedeutung erweisen, sowohl im Hinblick auf die Prüfung der Vorhersagen an der Natur als auch für die Wahrnehmung weiterer Sinneserlebnisse.

2.4. Prüfung an der Erfahrung

Die Theorie liefert Vorhersagen, deren Prüfung an den Erfahrungstatsachen (Beobachtungen und Experimenten) notwendig ist, um den Prozess vollenden zu können. Dabei ist eine Reihe von Unsicherheitsfaktoren zu berücksichtigen (vgl. Holton, 1979, S. 123f.).

So ist es durchaus möglich zu richtigen Vorhersagen zu kommen, die sich aus (aus heutiger Perspektive) falsch gesetzten Axiomen ergeben. Man denke dabei etwa an die Phlogiston-Theorie, mittels der u. a. erklärt werden konnte, warum Körper brannten, warum sich die Eigenschaften von Metallen untereinander stärker ähnelten als die der Erze, oder auch warum eine Kerze in einem abgeschlossenen Luftvolumen erlischt (Kuhn, 1967, S. 137f.).

Auch ist die erkenntnistheoretische Einschränkung zu berücksichtigen, nach der Theorien prinzipiell nicht endgültig bewiesen werden können und sich lediglich in der Anwendung als wiederholt nützlich und plausibel zeigen können.

Als dritte Einschränkung sei angeführt, dass experimentelle Ergebnisse und ebenso (instrumentengetstützte) Beobachtungen grundsätzlich einer gewissen Unzuverlässigkeit unterliegen und damit häufig nur

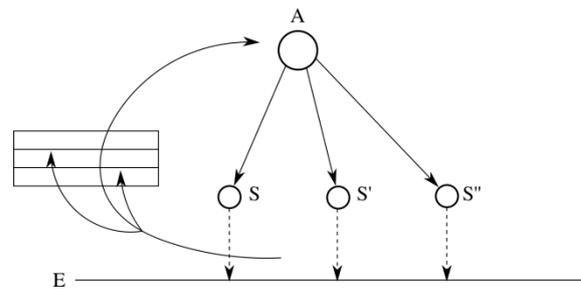


Abb. 2: Erweiterung des EJASE-Prozesses durch Holton

im Verbund, nicht jedoch in Form von Einzelbeobachtungen, als Testfall für Theorien infrage kommen.

2.5. Erweiterung des EJASE-Modells

Um zu einem wirklich praktikablen Modell zu kommen, das u. a. auch die Besonderheiten von Beobachtungen und die Persönlichkeit der beteiligten Forscher adäquat abzubilden vermag, ist eine geringfügige Erweiterung des Modells erforderlich. Gerald Holton merkt zum EJASE-Prozess kritisch an, dass der Gedankensprung dem Wissenschaftler einerseits die Freiheit geben muss, einen solchen gedanklichen Sprung überhaupt zu vollführen. Andererseits muss jedoch ebenso eine Beschränkung der Freiheit dafür sorgen, dass nicht jeder beliebige gedankliche Sprung vollführt wird (Holton, 1973). Wie sonst sollte schließlich in endlicher Zeit ein geeignetes Axiom oder ein neuer Begriff gefunden werden, ohne dass diese im unbeschränkten Gewirr der Gedanken untergingen? Nach Holton sind dafür die von ihm so bezeichneten Filter notwendig (Abb. 2), um die aufkeimenden Ideen aussortieren und nur solche passieren zu lassen, die gewissen Kriterien genügen. Bei einem solchen Filter könnte es sich etwa um eine bestimmte Grundüberzeugung handeln, bei der es sich nicht notwendigerweise um eine physikalische handeln muss (Krause, 2017).

Als Beispiel für solche Überzeugungen, die als Filter wirken, seien hierzu die Überzeugungen von Johannes Kepler (1571-1630) und Wolfgang Pauli (1900-1958) angeführt. Im Falle Johannes Keplers sind die wesentlichen erkenntnisleitenden Prinzipien für sein frühes Modell des Planetensystems (in seiner Veröffentlichung „Mysterium cosmographicum“) in seinen religiösen Überzeugungen und Vorstellungen zur Zahlenmystik zu finden. Sie zeigen sich in einer gedanklichen Verschachtelung platonischer Körper, aus denen sich die Reihenfolge und die Abstände der Planeten ergeben (Simonyi, 2012, S. 190). Für Pauli war seine Überzeugung für die Gültigkeit der Energieerhaltung die Antriebsfeder, die ihn zur Postulierung des bis dahin unbekanntenen Neutrinos brachte (Simonyi, 2012, S. 506).

Solche Überzeugungen, die eine leitende Funktion bei der Theoriebildung und -modifikation besitzen, werden in der Wissenschaftstheorie mit unterschiedlichen Bezeichnungen versehen. Bei Thomas Kuhn findet man sie etwa unter dem Begriff des Paradigmas (Kuhn, 1967), während Gerald Holton sie als Themata bezeichnet (Holton, 1984). Für die Didaktik wurden sie von Krause aufbereitet und werden hier unter dem Begriff des Denkprinzips zusammengefasst (Krause, 2013).

Neben der persönlichen Überzeugung der Gültigkeit bestimmter Prinzipien, kommen auch psychologische oder physiologische (d. h. sensorische) Filter als Einflussfaktor in Betracht. Wie ein persönlicher Filter zustande kommt und wie seine Wirkung zu verstehen ist, wird im weiteren Verlauf am konkreten Beispiel deutlich.

Einen ausführlichen Überblick über verschiedene (alternative) Modelle zum Zusammenspiel von Experiment, Beobachtung und Theorie bietet die Arbeit von Heine (Heine, 2018, S. 41-68).

3. Erkenntnisgewinnung durch Beobachtung am historischen Beispiel

Bei dem Gedanken an Hurrikans mögen uns heute sofort die damit einhergehenden immensen Verwüstungen, die durch die Verfügbarkeit von entsprechendem Bildmaterial sehr eindringlich sind, vor dem inneren Auge erscheinen. Auch die charakteristische Struktur eines solchen Sturms blizt häufig als ein vertrautes Bild im Gedächtnis auf (Abb. 3). Das Bild eines Hurrikans, als rotierendes und mit einem markanten Auge versehenes System, ist selbstredend im Wesentlichen ein Produkt der modernen Raumfahrt- bzw. Satellitentechnologie. Wie aber war der Prozess der Erforschung derartiger Ereignisse, die aufgrund ihres erheblichen Bedrohungspotentials schon immer von gesteigertem Interesse waren?

3.1. Kenntnisstand im 18. Jahrhundert

Das Wissen um meteorologische Phänomene und Prozesse war bis weit in die Neuzeit sehr dürftig und stützte sich bis in das 17. Jahrhundert hinein auf griechische Vorbilder (Fleming, 1990, S. 1). Aufgrund des resultierenden, leichten Zugangs zu Originalquellen, stellt dies aus heutiger Sicht jedoch einen willkommenen Vorteil dar.

Aus dem Bereich der Stürme und Windsysteme sind die Passatwinde zwar seit geraumer Zeit bekannt, jedoch nur aus Sicht der praktischen Anwendung. Reisen über den Atlantik konnten durch geschickte Nutzung der Windsysteme erheblich verkürzt werden. Eine Theorie zu ihrer Erklärung hätte dagegen die globalen Zirkulationsmuster umfassen müssen. Es existierten jedoch bereits Vermutungen, dass Temperaturunterschiede eine wesentliche Voraussetzung für diese Systeme darstellten (Redfield, 1831, S. 18).



Abb. 3: Satellitenbild des Hurrikans Katrina am 28. August 2005 (Quelle: NOAA, lizenzfrei, [nedis.noaa.gov/content/hurricane-katrina](https://www.noaa.gov/content/hurricane-katrina))

Auch die großräumige Strömung, die entlang der Ostküste der USA nach Norden gerichtet ist, war bereits früh bekannt (Redfield, 1831, S. 29).

Stürme hingegen wurden lange Zeit als ein rein lokales Phänomen aufgefasst. Erst Benjamin Franklin (1706-1790) wird zugeschrieben, erstmals die Zugrichtung eines Sturms nachträglich rekonstruiert zu haben. So war für ihn in Philadelphia eine Mondfinsternis aufgrund eines Sturms und der damit einhergehenden geschlossenen Wolkendecke nicht zu beobachten, während die Finsternis in Boston noch zu sehen war, bevor der Sturm auch dort eintraf (Moore, 2016, S. 169).

Als eine mögliche Ursache für atmosphärische Erscheinungen aller Art, und Stürme im speziellen, wurden auch elektrische, magnetische oder astronomische Einflüsse in Betracht gezogen (Fleming, 1990, S. 26).

3.2. Anstoß zur Weiterentwicklung durch William Redfield

Eine deutliche Weiterentwicklung der Meteorologie gelang William C. Redfield (1789-1857) mit seiner Publikation von 1831. Redfield war ausgebildeter Mechaniker und als Ingenieur und Betreiber von Dampfschiffen auf dem Hudson-River tätig. Er verfügte damit über keinerlei wissenschaftliche Vorbildung im klassischen Sinn. An dieser Stelle sei auf Thomas Kuhn verwiesen, der die These aufstellt, dass fundamentale Weiterentwicklungen von Theorien meist solchen Personen gelingen, die entweder sehr jung oder auf dem entsprechenden Gebiet der Forschung noch nicht lange aktiv sind (Kuhn, 1967, S. 125). Beides trifft (sofern man den Zeitpunkt des Beginns seiner Untersuchungen im Jahr 1821 zugrunde legt) auf Redfield zu.

Redfields Untersuchungen basieren auf dem Hurrikan von 1821, d. h. zwischen den ursprünglichen Beobachtungen und der endgültigen Publikation vergingen 10 Jahre.

In der Folge des besagten Hurrikans von 1821 bemerkte Redfield, dass in angrenzenden Bundesstaaten an der Ostküste der USA die Bäume an verschiedenen Orten in unterschiedliche Richtungen umgestürzt waren. Er nahm diese Beobachtung zum Anlass, sich intensiver mit dem Sturm zu beschäftigen (Redfield, 1831, S. 28).

3.3. Axiomentwicklung

3.3.1. Axiom I: Hurrikans als rotierende Systeme

„Some account of the phenomena and ascertained progress of a south-eastern storm, which occurred in September, of the year 1821, may, in its leading features, apply to many other storms, and will, it is believed, afford sufficient ground for the conclusion which we shall attempt to establish.“ (Redfield, 1831, S. 20).

Bei der Darstellung seiner Theorie wählt Redfield seine Beobachtung in Connecticut aus dem Jahre 1821 als Startpunkt. Hierbei beschreibt er, wie die Windrichtung im Verlauf des Sturms von einer südlichen zu einer südöstlichen Richtung wechselte. Nach vier Stunden klang der Sturm plötzlich für zwölf Minuten ab, um anschließend aus nordwestlicher Richtung wieder aufzuleben.

Redfield schildert weiterhin, dass ebenjener Sturm auch in New York (drei Stunden früher), Massachusetts (einige Stunden später) und Rhode Island (einige Stunden später) mit jeweils unterschiedlicher Stärke wütete.

Es folgt die Darlegung der zentralen Fragen des Aufsatzes:

„In reviewing these facts, we are led to inquire how, or in what manner it could happen, that the mass of atmosphere should be found passing over Middletown for some hours, with such exceeding swiftness, towards a point apparently within thirty minutes distance, and yet never reach it; but a portion of the same or a similar mass of air, be found returning from that point with equal velocity? And how were all of the most violent portions of these atmospheric movements which occurred at the same point of time, confined within a circuit whose diameter does not appear to have greatly exceeded one hundred miles?“ (Redfield, 1831, S. 21).

Diese Frage wird von Redfield unmittelbar beantwortet:

„This storm was exhibited in the form of a great whirlwind.“

Was Redfield hierauf folgen lässt, sind die ausführlichen Begründungen für seine Schlussfolgerung. Hierbei bedient er sich zunächst einer Analogie, indem er vom Phänomen der Tornados ausgeht, die er wohl völlig zurecht als *„common to most persons who are at all conversant with the subject of meteorology“* bezeichnet (Redfield, 1831, S. 21). Darauf aufbauend wird die Hypothese entwickelt, dass das Phänomen einer rotierenden Luftmasse als skalierbar angenommen werden darf:

„It is believed that no valid reason can be shown, why much larger masses of the atmosphere may not acquire, and develop, rotative movements [...].“ (Redfield, 1831, S.22).

Für einen Bewohner des nordamerikanischen Kontinents ist ein Tornado ein wohl bekanntes und sehr beeindruckendes Beispiel der speziellen meteorologischen Bedingungen der Region. Wenn nicht aus dem unmittelbaren Erleben – und sei es in Form einer Wasserhose – so dürften die Eigenheiten und Auswirkungen eines solchen Ereignisses zumindest durch die Medien gut bekannt gewesen sein.

Das Vorhandensein einer solch geeigneten Analogie macht gleichzeitig deutlich, warum der europäischen Meteorologie die Entwicklung eines vergleichbar weittragenden Ansatzes bis zu jener Zeit nicht gelungen war: Es fehlte schlicht an der notwendigen Inspiration.

In dem hier verwendeten Modell der Erkenntnisgewinnung lässt sich die Wirkung solcher mittelbaren oder unmittelbaren persönlichen Eindrücke leicht in Form eines entsprechenden Filters abbilden, der hier als ein psychologischer bezeichnet werden soll. Wer einmal Zeuge der verheerenden Zerstörungskraft solcher schnell rotierenden Luftmassen geworden ist, dem dürfte sich das Ereignis für immer ins Gedächtnis einbrennen.

Durch die gefundene Analogie wird – mit Redfields Worten – auf einleuchtende Weise nachgewiesen, wie es zu einer Umkehr der Windrichtung im Augenblick des Vorüberzugs einer solchen rotierenden Luftmasse kommt. Ebenso wird klar, dass unmittelbar im Zentrum kein bzw. kaum Wind zu spüren sein wird (Redfield, 1831, S. 23).

Redfield sieht diese Eigenschaften von Tornados auch für den Sturm von 1821 als erfüllt an. Dabei sollen die erheblich größere Luftmasse sowie die mit der größeren Fläche einhergehende vergrößerte Reibung die Windgeschwindigkeit und damit die zerstörerischen Effekte verringern.

3.3.2. Axiom II: Hurrikans als bewegliches System

Ein rotierendes System allein konnte die Beobachtung jedoch nicht vollständig erklären, da die Bewegung des Systems als Ganzes noch unklar blieb. Der zweite Teil der zentralen Frage bestand weiter.

Redfield griff zur weiteren Erklärung, neben seinen persönlich angestellten Beobachtungen, dazu auf weiteres Material zurück, das ihm u. a. in öffentlichen Quellen, etwa in Form von Zeitungsberichten zur Verfügung stand. Er sammelte insgesamt 40 Datensätze, aus denen jeweils hervorgeht, ob zu einer bestimmten Zeit im fraglichen Gebiet der Sturm spürbar war, aus welcher Richtung der Wind wehte und wie stark man ihn jeweils einschätzte. Damit sollte einerseits die Route des Sturms nachvollzogen und andererseits die Behauptung für die

Natur des Sturms als ein rotierendes Gebilde untermauert werden.

Anhand der gesammelten Daten war er in der Lage, die Zugrichtung des Sturms ausgehend von den Turks- und Caicosinseln, entlang der nördlichen Ostküste der USA, zu rekonstruieren (Abb. 4). Aufgrund der Datendichte (nur ein Datenpunkt bei besagter Inselgruppe) war die Rekonstruktion der Zugrichtung dabei im südlichen Abschnitt mit großen Unsicherheiten behaftet, erreichte jedoch für den nördlichen Küstenabschnitt eine beachtliche Genauigkeit.

Die Angaben erfolgen dabei in knapper Form, wie sie nachfolgend beispielhaft für zwei Einträge angegeben sind:

„At Ocracock bar, N. C. at day light on the morning of the 3d, a severe gale from east-south-east.

A ship from Boston, bound to Norfolk, experienced nothing of the gale. On the 3d, was in Lat. 40° 19', weather foggy, and light winds from south-east.” (Redfield, 1831, S. 24-26).

In seiner Zusammenfassung bemerkt Redfield, dass sich der Sturm nur mäßig weit ins Inland erstreckte und sein Einfluss auf der offenen See ebenso räumlich beschränkt war. In diesen Grenzen bewegte er sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit entlang der Küste, wobei sein Ursprung vermutlich bei den Westindischen-Inseln gelegen haben dürfte.

Aus den Daten ergibt sich weiterhin eine Zuggeschwindigkeit von etwa 30 nautischen Meilen (ca. 55,6 km) pro Stunde.

Für den mittleren Bereich der Zugroute, d. h. vor der mittleren Ostküste der Vereinigten Staaten, ließ sich noch ein weiteres Detail feststellen: Auf schwere Sturmböen aus südöstlicher folgten unmittelbar solche aus der entgegengesetzten Richtung. Anzeichen für ein direktes Vorüberziehen sah Redfield etwa für Cape Henlopen, Delaware:

„[...] the gale or hurricane commenced at half past 11, A. M. from east-south-east, shifted in twenty minutes to east-north-east, and blew very heavy for nearly an hour. A calm of half an hour succeeded, and the wind then shifted to the west-north-west, and blew, possible, with still greater violence.” (Redfield, 1831, S. 25).

Diese auffälligen Beobachtungen deuten auf ein unmittelbares Vorüberziehen des Zentrums des Sturms hin. Auch Long Island sowie die Staaten Connecticut und Massachusetts wurden unmittelbar vom Zentrum des Hurrikans getroffen, bevor sich dessen weitere Zugroute mangels Berichten nicht weiter rekonstruieren ließ.

3.3.3. Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften atlantischer Stürme

Redfield fasst in vier Punkten diejenigen Phänomene zusammen, die er für generelle Eigenschaften von Stürmen hält. Dies sind im Einzelnen (die Wieder-

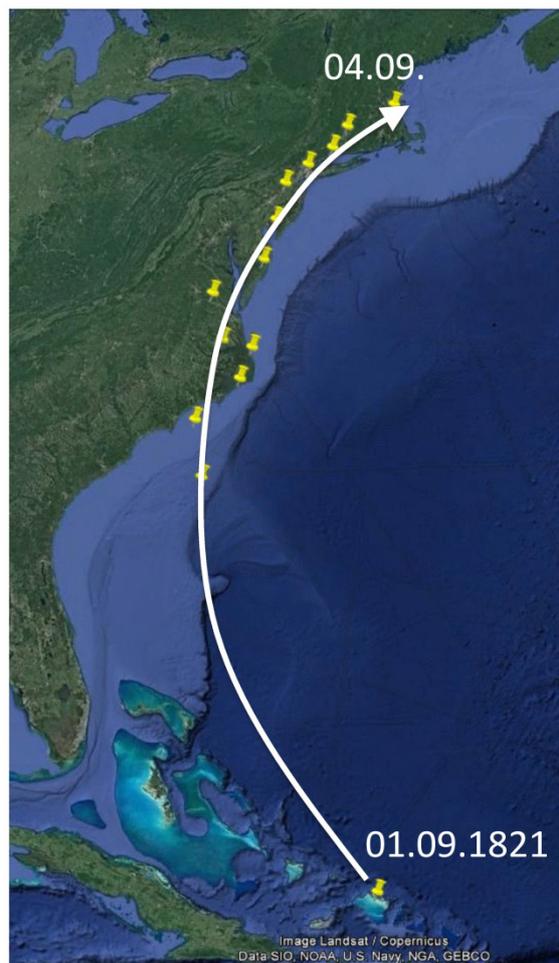


Abb. 4: Rekonstruktion der Zugroute des Hurrikans von 1821 auf Basis von Redfields Datenmaterial. (Quelle der Satellitenaufnahme: Google Earth, Landsat / Copernicus, SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Nutzungsbedingungen: google.com/permissions/geoguidelines/)

gabe erfolgt gekürzt, Übersetzung durch den Verfasser):

- Das gleichmäßige Voranschreiten des Sturms, das unbeeinflusst von der Windrichtung abläuft, mit der sich der Sturm an bestimmten Orten zeigt.
- Der beschränkte Durchmesser von Tornados und den hier betrachteten Stürmen, im Verhältnis zur Länge ihrer jeweiligen Zugbahn, ist ein Hinweis auf die Ähnlichkeit der zugrundeliegenden Wirkungsweisen.
- Das regelmäßige und offensichtliche Verhältnis, in dem Durchmesser und Zuggeschwindigkeit zur Dauer an jedem ihres Vorüberzugs stehen.
- Die verschiedene und entgegengesetzte Richtung, in die der Wind auf entgegengesetzten Seiten der Zugbahn weht (Redfield, 1831, S. 27).

Seine Annahme eines gewaltigen, rotierenden und sich langsam nach Norden bewegenden Sturmsystems schuf erstmals die Möglichkeit, die Beobachtungen in ihrer Gesamtheit zwanglos zu erklären.

Es handelt sich bei Redfields Untersuchung damit um eine deutliche Demonstration, wie eine (direkte und indirekte) systematische Naturbeobachtung die Formulierung von neuen Axiomen und damit die Umformulierung einer Theorie erlaubt.

3.4. Prüfung der Theorie

Wie eingangs erwähnt (siehe Abschnitt 2), ist es eher unüblich, dass ein einzelner Wissenschaftler den gesamten Prozess der Erkenntnisgewinnung oder auch nur weite Teile davon eigenständig durchläuft. Redfield stellt hierbei eine Ausnahme dar, da er in seinem Beitrag bereits weitere Beispiele anführt, an denen die Gültigkeit geprüft werden kann. Innerhalb eines relativ neu erschlossenen Themengebietes ist eine weitgehende Bearbeitung durch eine Einzelperson entsprechend einfacher, als dies bei einem bereits elaborierten Gebiet möglich wäre.

In Redfields Fall sollen einerseits weitere Stürme aus der südöstlichen Richtung auf ihre Übereinstimmung mit den Vorhersagen überprüft werden und andererseits auch die Möglichkeit der weiteren Verallgemeinerung auf Stürme aus nordöstlicher Richtung untersucht werden.

Für die Übertragung auf Stürme aus nordöstlicher Richtung müssen nach Redfield zunächst Überlegungen zur Größe angestellt werden. Er stellt fest, dass ein Sturm, der mit seinem Zentrum entlang der Küste zieht, allerlei Einflüssen unterliegt, wie etwa den Höhenzügen im Landesinneren. Daraus ergibt sich – unter der impliziten Annahme einer runden Form – eine Limitierung der Ausdehnung einer solchen Sturms. Einen Beleg findet Redfield wiederum in dem (als bekannt vorausgesetzten) Umstand, dass solche Stürme niemals weit auf die offene See hinausragen. Aus diesem relativ kleinen Durchmesser ergibt sich, im Zusammenhang mit der vorherrschenden südlichen Windrichtung, eine entsprechend kurze Dauer für Stürme aus südöstlicher Richtung (jeweils bezogen auf einen bestimmten Ort).

Für einen Sturm aus nordöstlicher Richtung nimmt Redfield an, dass sich die Rotationsachse (und damit das Zentrum des Sturms) in deutlich größerer Entfernung von der Küste befinden muss. Sind seine Auswirkungen ebenfalls im Landesinneren zu spüren, so folgt daraus, dass der Sturm einen deutlich größeren Durchmesser hat. Ein größerer Durchmesser, in Verbindung mit einer geringeren Zuggeschwindigkeit entgegen der vorherrschenden Windrichtung, vermag wiederum die (als allgemein bekannt vorausgesetzte) längere Dauer eines solchen Sturms hinreichend zu erklären.

Für die Leserschaft seines Beitrages gibt Redfield weiterhin konkrete Vorhersagen an, welche Abfolge von Windrichtungen in Abhängigkeit der Position des Beobachters innerhalb eines Sturms zu erwarten ist (Redfield, 1831, S. 30).

Er führt weiterhin fünf Beispiele für Stürme auf, die er auszugsweise anhand gesammelter Daten belegt, um anschließend Zugrichtung, Zuggeschwindigkeit

und die Ausdehnung des jeweiligen Sturms zu rekonstruieren. Im Einzelnen sind dies die Stürme vom:

- a) 17. August 1830 (New York)
- b) 26./27. August 1830 (New York)
- c) 20. September 1830 (30° N, 40° W)
- d) 24. September 1830 (Neufundland)
- e) 29. September 1830 (nördlich von Anguilla)

Für den Sturm vom 26./27. August 1830 verweist Redfield gesondert auf dessen besonders niedrige Zuggeschwindigkeit, die er mit etwa 10 Meilen pro Stunde angibt.

Die unter c) und d) aufgeführten Stürme werden dabei lediglich genannt, ohne sie mit detaillierten Meldungen zu belegen.

Redfield ist bemüht, auch länger zurückliegende – und als besonders schwerwiegend in Erinnerung gebliebene – Stürme aufzuführen. Dazu gehören die Hurrikans von 1804 und 1815. Hierbei ist es sein zentrales Anliegen zu zeigen, dass für jeden dieser Stürme die generelle Zugrichtung identisch ist. Weiterhin existiert nach Redfield in den Aufzeichnungen kein einziges Gegenbeispiel:

„[...] it is believed that, of the storms of the last forty years, the route and corresponding character of all those which have been sufficiently violent to receive notice in the marine reports, can be traced in a similar manner; while not an instance of a contrary kind has come to our knowledge.“ (Redfield, 1831, S. 43).

3.5. Erweiterung der Theorie um die Entstehung von Hurrikanen

Ausgehend von der gelegentlich auftretenden Möglichkeit, die Bahn von Stürmen über weite Entfernungen zu verfolgen, wagt Redfield auch den Versuch, deren Herkunft zu ergründen. Ausgangspunkt sind hierbei die bekannten Passatwinde, deren Luftmassen sich konstant in Richtung amerikanischer Kontinent und Golf von Mexiko bewegen. Der Kontinent und insbesondere die Gebirgszüge stellen, wie Redfield bereits an früherer Stelle bemerkte, ein Hindernis für diese Luftmassen dar, die folglich in Richtung der gemäßigten Breiten abgelenkt werden.

Ein Teil der Luftmassen nimmt dabei eine „Abkürzung“ vom Golf von Mexiko in Richtung Norden, woraus sich im Herbst und Winter eine Wechselwirkung mit den ungestörten Passatwinden im östlichen Bereich des Golfs ergeben kann. Prallen diese Luftmassen auf die Archipele der nördlichen Karibik, so sollen sie letztendlich großräumig in Rotation versetzt werden. Die Stürme werden nun mit der vorherrschenden Windrichtung entlang der Küsten nach Norden getrieben, bis sie sich schließlich im Nordatlantik auflösen oder – so vermutet bereits Redfield – sogar (das nördliche) Europa erreichen (Redfield, 1831, S. 32).

Auch hinsichtlich der möglichen Entstehungsprozesse ließ sich Redfield von Analogien leiten: Zunächst wird ein bestimmtes „Luftpaket“ durch orografische Reibung an den Inselketten der Karibik in Rotation versetzt. Es tritt sodann mit dem nachfolgenden Luftpaket in Wechselwirkung, ganz so wie es bei Zahnrädern der Fall ist. Das zweite Paket wird folglich den umgekehrten Drehsinn aufweisen. Auch bei dieser Analogie ist unschwer zu erkennen, woran Redfield seine Überlegung anlehnte. Als Entwickler von Dampfschiffen waren komplexe mechanische Apparaturen ein gewohnter Anblick (Redfield, 1831, S. 48f.).

3.6. Grenzen der Theorie aus moderner Sicht

In seiner Auflistung der zentralen Eigenschaften (siehe Abschnitt 3.3.3) eines rotierenden Sturmsystems verzichtet Redfield bewusst darauf, eine vertikale Rotationsachse festzulegen. Wiederum unter Nutzung der Analogiemethode stellt er mit Verweis auf Tornados fest, dass die Achse durchaus über eine beträchtliche Inklination verfügen dürfe, d. h. auch eine horizontale Lage einnehmen könne. Eine solche Lage der Achse nimmt er etwa bei der Entstehung von Gewittern, Sturmböen und Hagelstürmen an (Redfield, 1831, S. 28). Auch sollen Winde, die von Bergen oder Hochplateaus herab wehen, auf rotierende Windsysteme mit derart gekippten Rotationsachsen zurückzuführen sein.

Es handelt sich hierbei um eine Überschätzung des Potentials seiner neuen Theorie, wie sie häufig nach wesentlichen Schritten der Weiterentwicklung und erst recht im Rahmen von Paradigmenwechseln auftreten. In seiner Annahme, die Gravitation sei die einzig relevante Größe für die Entstehung, Aufrechterhaltung und Form von Stürmen, zeigt Redfield eine Form der Übergeneralisierung des gefundenen Ansatzes. Das neu gefundene Erklärungsmuster weit über die aus moderner Sicht gültigen Grenzen herauszuschieben, ist ein Verhalten, das sich im Rahmen von Paradigmenwechseln (jedoch nicht ausschließlich dort!) durchaus häufiger beobachten lässt. Ein Beispiel hierfür findet sich etwa bei Galilei, der glaubte nachweisen zu können, dass auch für große Winkel (bis 90°) die Schwingungsdauer des Pendels unabhängig von der Amplitude ist (Kuhn, 1967, S.160-168).

Die gesamte Thermodynamik, auf die beispielsweise sein Konkurrent James P. Espy (1785-1860) seine eigene Theorie der Stürme (wiederum ausschließlich!) stützte, spielte für Redfield keine oder allenfalls eine so untergeordnete Rolle, dass sie getrost vernachlässigt werden konnte.

Der Ansatz Espys, der als Erwiderung auf Redfields Theorie verstanden werden kann, geht von konkreten Experimenten aus und deduziert aus diesen experimentellen Erkenntnissen zunächst vergleichbare Vorhersagen über das Verhalten der Luftmassen. Dabei wird hier eine Fülle von Befunden angeführt, ausgehend von den Untersuchungen Daltons und

Gay-Lussacs zum Wasserdampfgehalt der Luft, über die Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe, bis hin zu Wärmekapazitäten und latenter Wärme. Ebenso fließen gewisse Beobachtungen ein (u. a. auch solche, die namentlich auf Redfield zurückgeführt werden), die etwa die generelle Zugrichtung von atlantischen Stürmen beschreiben. Gleichzeitig verzichtete Espy auf mechanische Erklärungsansätze im Stile Redfields, so dass ihm die Rotation der Sturmsysteme verborgen blieb und er stattdessen von einer stets radial zum Zentrum gerichteten Strömung ausging (Espy, 1841).

Auch die elektrischen Eigenschaften der Luft, deren Einfluss von etlichen zeitgenössischen Wissenschaftlern als maßgeblich eingeschätzt wurden, ignorierte Redfield. Der sich zwischen Redfield und Espy sowie einigen anderen Forschern entwickelnde Disput basierte auf einem Meinungs austausch, der von Datensammlungen flankiert wurde. Die zunächst auf visuellen Beobachtungen basierenden Sammlungen wurden zunehmend auch um einfache instrumentengestützte Beobachtungen erweitert. Bedingt durch den frühen Entwicklungsstand von Thermo- und Elektrodynamik kamen quantitative Beiträge allenfalls selten als Argument zum Einsatz.

Redfield konnte – ebenso wenig wie seine Zeitgenossen – keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von Stürmen vornehmen. Dies machte sich insbesondere auch bei internationalen Vergleichen bemerkbar. Etwa wenn der deutsche Physiker und Meteorologe Heinrich Wilhelm Dove (1803-1879) großräumige europäische Zyklone mit den Ergebnissen Redfields verglich und keine klare Übereinstimmung mit dessen Vorhersagen finden konnte (Kutzbach, 1979, S. 16). Die regionalen Besonderheiten des nordamerikanischen Kontinents machen sich hier besonders bemerkbar.

Aus heutiger Sicht sind für die Entstehung eines tropischen Wirbelsturms aus einer kleinräumigen Störung die folgenden Bedingungen (nach Klose, 2015, S. 435-438) zu erfüllen:

- a) Eine Temperatur des Oberflächenwassers von mindestens 27°C ,
- b) eine stabile Schichtung der Atmosphäre, die ein Aufsteigen warmer Luft ermöglicht,
- c) ein Abstand von wenigstens 5° vom Äquator, damit durch die Corioliskraft eine zyklonale Rotation hervorgerufen wird,
- d) eine geringe Windscherung für eine ungestörte Konvektion.

Insgesamt weist Redfields Untersuchung den beträchtlichen Nachteil auf, nur solche Stürme zu beschreiben, die durch rotierende Luftmassen verursacht werden. Durchaus häufig anzutreffen sind jedoch auch solche Windsysteme, die ihren Ursprung in durchziehenden Kaltfronten finden. Diese kann man ohne Einbezug der Thermodynamik nicht erklären. Aus dem relativ stark eingeschränkten und

nicht klar umrissenen (bzw. über Gebühr ausgedehnten) Anwendungsbereich ergaben sich dann auch bedeutende Schwierigkeiten für die beteiligten Forscher, eigene Daten in Übereinstimmung mit Redfields Theorie zu bringen.

3.7. Qualitätskriterien der Beobachtungen

Gegenüber experimentellen Wissenschaften besteht im Rahmen der beobachtenden Meteorologie keine Gelegenheit, die dargestellten Daten zu reproduzieren. Dementsprechend muss an die Stelle der Reproduzierbarkeit ein alternatives Qualitätskriterium treten (Redfield, 1831, S. 34).

Ein solches Kriterium stellte lange Zeit die Glaubwürdigkeit des Beobachters dar, die sich in seiner beruflichen Stellung oder seinem sozialen Status ausdrückte (Shapiro, 2003, S. 126). So galten Beobachtungen einfacher Seeleute als weniger vertrauenswürdig als die eines Kapitäns. Bei Redfield zeigt sich dieses Argumentationsmuster, wenn er die Beobachtungen von „*experienced and intelligent shipmasters*“ besonders hervorhebt (Redfield, 1831, S. 34).

Als weiteres Kriterium kann die wiederholte Beobachtung von Phänomenen der gleichen Art dienen. Redfield bemüht sich daher, Daten in vergleichbarer Qualität zu weiteren Stürmen aufzuführen (vgl. Abschnitt 3.4).

Er selbst stellt die mangelnde Verfügbarkeit von meteorologischen Daten heraus, wenn er unter Verweis auf Benjamin Franklin die Widersprüchlichkeit früherer Annahmen zu Stürmen aufzeigt (Redfield, 1831, S. 40).

Redfields Vermutung, es handele sich bei den vorherrschenden Westwinden auf dem nordamerikanischen Kontinent sowie auf dem Nordatlantik um einen Teil eines größeren, zirkulären Systems, stellt einen substantiellen Schritt auf dem Weg zum Verständnis großräumiger planetarer Windsysteme dar.

4. Schlussbemerkungen zur historischen Analyse

Der hier verwendete Ansatz, die historische Theoriebildung mit dem EJASE-Prozess Einsteins zu beschreiben, lässt sich ebenso auf die weiteren meteorologischen Theorien übertragen. Dazu gehört u. a. die Theorie Espys, die sich ganz wesentlich auf thermodynamische Überlegungen stützt, dabei jedoch die Vorstellung einer Rotation der Luftmassen um eine vertikale Achse ablehnt. Der nicht immer rein wissenschaftlich und rational ausgetragene Disput (Moore, 2016, S. 190-252) zeigt aus heutiger Sicht, dass nur aus der Synthese der widerstreitenden Positionen eine vollständige Erklärung der Entstehung von Hurrikans bzw. großräumiger meteorologischer Phänomene überhaupt möglich wurde. Diese erweiterte Perspektive erlaubt auch die Berücksichtigung der Wechselwirkung von Beobachtung und Experiment, die nur im engen Zusammenwirken einen vollständigen Blick auf die Natur ermöglichen.

Redfields Umgang mit den mechanischen Analogien und die Nichtbeachtung der thermodynamischen Eigenschaften der Atmosphäre zeigen deutlich das Potential und die Grenzen der Analogiemethode. Analogiebetrachtungen sind einerseits für den persönlichen Erkenntnisfortschritt ein äußerst hilfreiches Mittel, um die Kreativität zu fördern und in gewisse Bahnen zu lenken. Andererseits zeigt sich, dass die bloße Anwesenheit geeigneter äußerer Einflüsse allein noch nicht ausreichend ist, um in den Prozess der Axiomentwicklung und Theoriebildung einzufließen.

5. Literatur

- Anderl, Sibylle (2017): Das Universum und ich. Carl Hanser Verlag.
- Demtröder, Wolfgang (2013): Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme. 6., überarb. u. akt. Aufl. 2013. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Einstein, Albert (1956): Ideas and opinions. Unter Mitarbeit von Sonja Bargmann. 3. print. London: Redman.
- Einstein, Albert (2005): Mein Weltbild. Unter Mitarbeit von Carl Seelig. Zürich: Europa-Verl.
- Einstein, Albert; Solovine, Maurice (1960): Briefe an Maurice Solovine. Faksimile-Wiedergabe von Briefen aus den Jahren 1906 bis 1955 mit französischer Übersetzung, einer Einführung und drei Fotos. Berlin: Dt. Verl. der Wissenschaften.
- Espy, James Pollard (1841): The philosophy of storms. Boston: Little and Brown.
- Fleming, James Rodger (1990): Meteorology in America, 1800-1870. Baltimore, Md.: John Hopkins Univ. Press.
- Heine, Antje J. (2018): Was ist Theoretische Physik? Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik. Berlin: Logos Berlin (Studien zum Physik- und Chemielernen, 255).
- Holton, Gerald (1984): Themata zur Ideengeschichte der Physik. Vieweg+Teubner Verlag.
- Holton, Gerald James (1979): Einsteins Methoden zur Theoriebildung. In: Peter C. Aichelburg, Roman Ulrich Sexl und Peter Gabriel Bergmann (Hg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik. Braunschweig: Vieweg, S. 111–140.
- Klose, Brigitte; Klose, Heinz (2015): Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. 2. Aufl. Berlin: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch).
- Krause, Eduard (2013): Das Erhaltungsprinzip in der Physik und seine Anwendung im Physikunterricht. Dissertation. Online verfügbar unter

- <http://dokumentix.ub.uni-siegen.de/opus/volltexte/2013/772>.
- Krause, Eduard (2017): Das EJASE-Modell als Ausgangspunkt physikdidaktischer Forschungsfragen. In: *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* (16), S. 57-66.
- Kuhn, Thomas S. (1967): *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. 1.-4. Tsd. Frankfurt a. M.: Suhrkamp (Theorie, 2).
- Kuhn, Wilfried (1983): Das Wechselspiel von Theorie und Experiment im physikalischen Erkenntnisprozeß. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* (12), 355-362.
- Kutzbach, Gisela (1979): *The thermal theory of cyclones*. Boston, Mass.: American Meteorological Society (Historical monograph series).
- Kutzbach, Gisela (1979): *The thermal theory of cyclones*. Boston, Mass.: American Meteorological Society (Historical monograph series).
- Moore, Peter (2016): *Das Wetter-Experiment. Von Himmelsbeobachtern und den Pionieren der Meteorologie*. Unter Mitarbeit von Michael Hein. 1. Auflage. Hamburg: mare.
- Redfield, William C. (1831): *Remarks on the Prevailing Storms of the Atlantic Coast of the North American States*. In: *American journal of science and arts*. XX. (1), S. 17-51.
- Shapiro, Barbara J. (2003): *A culture of fact. England, 1550-1720*. 1. paperback printing. Ithaca, NY: Cornell Univ. Press.
- Simonyi, Károly (2012): *Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute*. 3. überarb. und erw. Aufl., [Nachdr.]. Frankfurt am Main: Deutsch.
- Thomas, Gary E.; Olivero, John J.; Jensen, Eric J.; Schroeder, Wilfred; Toon, Owen B. (1989): *Relation between increasing methane and the presence of ice clouds at the mesopause*. In: *Nature* 338 (6215), S. 490-492. DOI: 10.1038/338490a0.
- Tipler, Paul Allen; Mosca, Gene; Wagner, Jenny (2015): *Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.