

Ernst Mach und die Geschichte der Relativitätstheorie

Eren Simsek

„Nur wer die Vergangenheit kennt, kann die Gegenwart verstehen und die Zukunft gestalten.“ (zugeschrieben: August Bebbel).

1. Einleitung

In der Didaktik gibt es zahlreiche Theorien, von denen jede ihre eigene Entstehungsgeschichte hat [1]. Die historisch-kritische Didaktik, die ich im Folgenden näher erläutern werde, ist eines dieser pädagogischen Konzepte. Dabei wird betont, dass bestimmte Vorstellungen im Laufe der Zeit entstanden sind und durch kulturelle Einflüsse geprägt wurden. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse in einen solchen historischen Kontext zu stellen und dadurch verschiedene (geschichtliche) Perspektiven einzunehmen, ist überaus wichtig, um das kritische Denken der Schüler:innen anzuregen – siehe dazu auch [2].

Aktuelle Forschungsbestrebungen zielen darauf ab, diese auch im Kontext der Fachdidaktik anzuwenden [3, 4]. Ein klassisches Beispiel für die Anwendung der historisch-kritischen Methode im Physikunterricht wäre die Atomtheorie. Wie wir alle wissen, hat sich die Vorstellung von Atomen von den antiken griechischen Philosophen bis zur modernen Atomphysik stets weiterentwickelt und verändert. Wenn Schüler:innen die Physikgeschichte verfolgen, können sie verschiedene Modelle und Theorien vergleichen, die im Laufe der Zeit zur Lösung bestimmter wissenschaftlicher Probleme beigetragen haben; und sie werden erkennen, wie sehr sich die Vorstellungen – von „atomar“ (= unteilbar) bis radioaktiv – verändert haben. Dies kann dazu beitragen, dass die Schüler:innen ihre eigenen Überzeugungen und Vorurteile hinterfragen und ein tieferes Verständnis für komplexe Themen entwickeln.

Ähnlich spannend in diesem Zusammenhang sind auch andere Beispiele, wie die Relativitätstheorie und die Quantentheorie. Denken wir hier daran, welche weltanschauliche Herausforderungen es gegeben hat, um die Newton'sche Mechanik durch Einsteins Relativitätstheorie zu ersetzen. Oder erinnern wir uns an Einsteins eigenes Ringen um ein Verständnis der Verschränkung in der Quantentheorie [5]. Offensichtlich ist Einstein bis in unsere Zeit mit der Geschichte der modernen Physik eng verbunden; besonders faszinierend ist, dass er selbst erheblichen Nutzen aus der historisch-kritischen Methode von Ernst Mach gezogen hatte. Die Worte Machs, die er bereits mehrere Jahrzehnte vor der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie im Jahr 1905 veröffentlichte (1872), klingen fast wie ein leidenschaftlicher Aufruf:

„[...] In der That, wenn man aus der Geschichte nichts lernen würde, als die Veränderlichkeit der Ansichten, so wäre sie schon unbezahlbar. [...] Wer nur eine Ansicht oder eine Form einer Ansicht kennt, glaubt nicht,

dass je eine andere da gewesen, glaubt nicht, dass je eine andere kommen wird, der zweifelt nicht, der prüft nicht. [...]

Erwarten wir von der Geschichte alles, vor allem aber, was ich auch von meiner Geschichte hoffen will, dass sie nicht zu langweilig sei.“ (S. 3-4) [6]

Aus heutiger Perspektive erkennen wir, dass das Leben von Mach alles andere als langweilig war. Durch seine kritische und untersuchende Herangehensweise leistete er einen maßgeblichen Beitrag zur fortschreitenden Entwicklung der Wissenschaft in verschiedenen Gebieten. Nach Abschluss seines Studiums an der Universität Wien (1855-1860) gelang ihm im Jahr 1860 der experimentelle Nachweis des akustischen Doppler-Effekts. Ein Jahr darauf habilitierte er sich und wirkte fortan als Privatdozent in Wien. In dieser Phase begann er, sich intensiv mit der Sinnesphysiologie zu beschäftigen. Anschließend übernahm er eine Professur für Mathematik an der Universität Graz (1864-1866), um kurz darauf zum ordentlichen Professor für Physik (1866) ernannt zu werden. Die nach ihm benannten Mach-Bänder, die aus einer Arbeit aus dem Jahr 1865 resultieren, entstanden während dieser Zeit. Im Jahr 1867 nahm er den Ruf an die Karls-Universität in Prag an und übernahm den Lehrstuhl für Experimentalphysik. Während seiner Zeit dort fungierte er auch als Dekan des physikalischen Instituts und wurde 1883/84 zum Rektor der Universität ernannt. In Prag führte er als Experimentalphysiker bahnbrechende ballistische Versuche zur Erforschung von Überschallgeschwindigkeiten durch. Es ist bis heute beeindruckend, dass es ihm vor rund 130 Jahren gelang, ein fliegendes Projektil zu fotografieren. Offensichtlich war es ihm ein Anliegen, das unmittelbar Unsichtbare für wissenschaftliche Untersuchungen anschaulich zu machen. Seine herausragenden Beiträge zur Aerodynamik führten schließlich zur Benennung der Mach-Zahl, die das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit eines Objekts und der Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium beschreibt. Ebenso wurde der Mach-Kegel, eine Verdichtungswelle, die sich um Objekte bildet, die mit Überschallgeschwindigkeit fliegen, nach ihm benannt. Während seiner Zeit in Prag verfasste er auch Lehrbücher, in denen er die historisch-kritische Methode [7, 8] verfolgte und klassische Konzepte hinterfragte. Auf diese werden wir später noch genauer eingehen.

Schließlich wurde er im Jahr 1895 als Professor für Philosophie, insbesondere Geschichte und Theorie der induktiven Wissenschaften, an die Universität Wien berufen, was ihn zu einem Pionier in der Wissenschaftstheorie machte. Seine Ideen hatten einen enormen Einfluss auf die Mitglieder des Wiener Kreises, die sich für eine wissenschaftliche Weltanschauung einsetzten.

Als Experimentalphysiker und Wissenschaftstheoretiker vertrat Mach konsequent die Ansicht, dass unsere Erkenntnisse stets

durch Erfahrungen überprüft werden sollten. Diese Haltung verlieh ihm eine herausragende Position als Kritiker der klassischen Mechanik. In seinem Werk *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* [8], das heuer sein 140-jähriges Jubiläum feiert, behandelt er die Geschichte der Mechanik und argumentiert gegen dogmatische Konzepte wie den absoluten Raum oder die absolute Zeit, deren „Absolutheit“ nicht experimentell überprüfbar waren. Dadurch ebnete er den Weg für Einsteins Relativitätstheorie. Heutzutage sind ausreichend Dokumente verfügbar, die diese Perspektive umfassend veranschaulichen. Beispielsweise liefern die Briefkorrespondenz zwischen Mach und Einstein [9] sowie Einsteins eigene Artikel hierzu wichtige Belege. In seinem Nachruf Ernst Mach drückt Einstein dies treffend aus:

„Niemand kann es den Erkenntnistheoretikern nehmen, daß sie der Entwicklung hier die Wege geebnet haben; von mir selbst weiß ich mindestens, daß ich insbesondere durch Hume und Mach direkt und indirekt sehr gefördert worden bin. Ich bitte den Leser, Machs Werk: ‚Die Mechanik in ihrer Entwicklung‘ in die Hand zu nehmen und die unter 6. und 7. im zweiten Kapitel gegebenen Betrachtungen (‚Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung‘ und ‚Übersichtliche Kritik der Newtonschen Aufstellungen‘). Dort finden sich Gedanken meisterhaft dargelegt, die noch keineswegs Gemeingut der Physiker geworden sind.“ (S. 102) [10]

Nach einer kurzen Einführung in Machs Kritik über den Raum und die Zeit, erklärt er weiter:

„Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert!“ (S. 103) [10]

Die oben angeführten Stellen unterstreichen eindeutig Machs signifikanten Einfluss auf Einsteins Denken. Doch wie konnte Mach allein durch seine Fähigkeit zur konstruktiven Kritik seiner Zeit derart voraus sein? Oder mit anderen Worten: Welchen Hinweisen von Mach ist Einstein wohl genau gefolgt und hat versucht bei seinen eigenen Konzepten umzusetzen?

2. Ernst Mach und die Geschichte der Speziellen Relativitätstheorie (SRT)

Bekanntlich ist die SRT (nach Einsteins eigenen Worten) eine Zusammenführung der Gebiete Mechanik und Elektrodynamik [11, S. 245 und 12]. Das Doppler'sche Prinzip war durch die Arbeiten von Christian Doppler und Ernst Mach bereits vor der SRT in beiden Gebieten (Mechanik und Elektrodynamik) anerkannt. Dies führte unmittelbar zu der Frage, wie diese Analogie zwischen Licht- und Schallwellen nun zu verstehen war. Prinzipiell musste ebenso darüber nachgedacht werden, ob die Analogie zwischen Luft und Äther gerechtfertigt war [13, S. 218-220 u. 14]. Bei genauerer Untersuchung von Machs Werken ist erkennbar, dass er beim optischen Dopplereffekt [15] auf das spekulative Ausbreitungsmedium (= Äther) des Lichts gar nicht eingeht und allgemein nur die relative Bewegung zwischen Empfänger und Sender bespricht.

Darüber hinaus beschäftigt er sich sowohl mit dem Modell von Teilchen [15, S. 8] als auch mit dem mathematischen Modell von Wellen. Auch in seinen anderen Arbeiten zur Optik wird Äther nicht behandelt [16]. Da Mach es ablehnte, einen absoluten Raum in der Physik zu vertreten, dürfte ihm wohl auch ein Äther, der diesen absoluten Raum – mit seinen widersprüchlichen Eigenschaften – ausfüllt, nicht ganz geheuer gewesen sein. Seine Position war es, dass Wissenschaftler möglichst ökonomisch vorgehen sollten, weshalb er es wohl als das Beste ansah, dem Äther keine wichtige Bedeutung zu geben. Diese Sichtweise hatte natürlich Einfluss auf die Physikergemeinschaft. Deshalb versuchte Emil Cohn (ab 1900) [17] eine Elektrodynamik ohne einen absoluten Raum und Äther zu entwickeln.

Dieser Zugang dürfte auf Einstein einen wichtigen Einfluss gehabt haben. Obwohl er zu Beginn an einem Äther festhielt [18, S. 230, 233] begann er wohl aufgrund der negativen Ergebnisse von Michelson und Morley [19] und dem Zugang von Mach und Cohn, ebenfalls den Äther aus seinem Konzept auszulassen. Das mag heute vielleicht nicht als ein besonders großer Schritt erscheinen, verglichen mit jener Zeit war es jedoch ein großer Sprung ins Unbekannte. Heute wissen wir, dass das, was die Schallwellen von Lichtwellen unterscheidet, gerade die „Beziehung“ zu ihrem Medium ist, in dem sie sich ausbreiten. Kurz zusammengefasst: Im Vakuum sind Schallwellen unmöglich, da sie keine Ausbreitung finden. Im Gegensatz dazu bedarf das Licht gemäß dem relativistischen Doppler-Effekt keines Mediums für seine Ausbreitung. Das Licht entfaltet seine unveränderliche Natur, die Lichtgeschwindigkeit, gerade dort, wo keine Schallwellen existieren – im luftleeren Raum bzw. Vakuum [13, S. 218-220]. (Deswegen können beispielsweise die Photonen von der Sonne durch das Vakuum bis zu uns auf die Erde gelangen.) Und wenn es keinen Äther gibt, dann kann der relativistische Doppler-Effekt eigentlich nur ein raumzeitliches Phänomen [20] sein. Ein bemerkenswertes Werk, das die Verbindung zwischen Raum, Zeit und der SRT untersucht, ist Emil Cohns Buch *Raum und Zeit* [21]. Cohn widmete diese Erläuterung und Verteidigung der SRT dem Andenken von Mach [22]. Es ist erwähnenswert, dass Einstein selbst auf dieses Buch [21] aufmerksam gemacht hat und es als „eine vorzügliche Darstellung“ (S. 546) [23] bezeichnete. Dies unterstreicht womöglich erneut indirekt die Relevanz von Machs und Cohns Arbeiten und ihre Anerkennung durch Einstein.

Wenn wir nun auf unsere Diskussion zurückblicken und Machs Einfluss auf die SRT zusammenfassen möchten, können wir folgende Schlussfolgerungen ziehen: Mach betonte die Notwendigkeit, dass die (theoretische) Physik stets experimentell überprüfbar sein sollte. Daher sollten in der Physik vorzugsweise nur Begriffe verwendet werden, die eine physikalische Wechselwirkung miteinander eingehen können. Dies gilt auch für grundlegende Konzepte wie Raum, Zeit und Materie, die daher eher relationale oder relative Charakteristika aufweisen sollten. Wenn ein Konzept, wie zum Beispiel der

Äther, nicht überprüfbar ist, sollte man (aus Gründen der Einfachheit) versuchen, die Physik ohne dieses Konzept zu beschreiben. In diesem Sinne wird auch Einsteins Aussage verständlich: „Ich hegte keinen Zweifel daran, dass sie auch vom philosophischen Standpunkt aus richtig ist. Sie stimmt auch mit der MACHschen Theorie überein.“ (S. 275) [24]

3. Ernst Mach und die Geschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)

In Bezug auf die Geschichte der ART scheint Machs Einfluss mannigfaltig gewesen zu sein. Wir wollen hier lediglich auf drei Punkte eingehen: Die Allgemeine Kovarianz, das Äquivalenzprinzip und die relativistische Kosmologie.

3.1. Die Allgemeine Kovarianz

Mit der SRT gelang es Einstein auf eine sehr elegante und ökonomische Weise, unterschiedliche Gebiete der Physik zu vereinen – doch das Programm „Relativität“ war für ihn noch nicht abgeschlossen. Spätestens im Jahre 1907 [24] zeigte Einstein seine Unzufriedenheit, weil das Konzept der Relativität – gemeint ist die hier die SRT – die beschleunigten Bezugssysteme nicht einbezog. Gemäß seinen Äußerungen wurde er offensichtlich durch Machs Kritik darauf aufmerksam: „MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien.“ (S. 276) [24]. Auch durch andere Quellen kann das einfach belegt werden [25]. In Bezug darauf sprach Hans Reichenbach, Schüler und Freund von Einstein, daher von der Existenz eines Mach'schen Programms bzw. vom „Anfang eines Programms“ (S. 252) [26].

3.2. Das Äquivalenzprinzip

Es ist nicht eindeutig festzustellen, ab welchem Zeitpunkt sich Einstein mit dem Problem der Äquivalenz von schwerer und träger Masse auseinandersetzte. Er las (September 1899) die Arbeit [27] von Wilhelm Wien, die eine der ursprünglichen Anregungen für Einstein bei der Entwicklung der Relativitätstheorie war [18, S. 233f.]. Bemerkenswerterweise bespricht Wien in seiner Schrift sowohl die Ausnahmestellung der Gravitation als auch die theoretisch nicht begründete Äquivalenz der trägen und der schweren Masse [27, S. XVI]. Zu jener Zeit (September 1899) begann Einstein auch, Machs Bücher zu lesen [18, S. 230]. Es lässt sich vermuten, dass er aufgrund der Arbeit von Wien [27] und Machs Buch *Mechanik* [8] mit der theoretischen Herausforderung vertraut war und diese möglicherweise bewusst oder unbewusst in Erinnerung behielt.

Wahrscheinlich entschied Einstein erst im Jahr 1907, sich zu diesem Thema zu äußern, weil er höchstwahrscheinlich von Plancks Abhandlung *Zur Dynamik bewegter Systeme* [28] beeinflusst wurde; in dieser Schrift ging Planck auf die

Äquivalenz von schwerer und träger Masse sowie Energie ein [28, S. 32].

Dank der SRT war es nämlich möglich zur Äquivalenz von (träger) Masse und Energie ($E = m \cdot c^2$) zu gelangen. Wenn es physikalisch zulässig ist, die Masse durch die Energie zu definieren, verliert die konzeptionelle Unterscheidung zwischen träger und schwerer Masse ihre ursprüngliche Bedeutung. Aus diesem Grund tritt in Einsteins Schrift *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen* (1907) [29] erstmals das Äquivalenzprinzip [29, S. 454] in Erscheinung. (Sobald diese Akzeptanz erfolgt, besteht nun die Möglichkeit, ein homogenes Gravitationsfeld als äquivalent zu einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem zu betrachten.) Einstein bezeichnete das Gedankenexperiment, das ihn zu diesem Prinzip führte, als der „glücklichste Gedanke meines Lebens“ (S. 265) [11]. Dabei stellt er sich „*vom Dach eines Hauses frei herabfallenden Beobachter*“ vor, „für“ den „*während seines Falles – wenigstens in seiner unmittelbaren Umgebung – kein Gravitationsfeld*“ (S. 265) [11] existiert. Durch die Anwendung von verschiedenen Gedankenexperimenten, wo das Äquivalenzprinzip vorausgesetzt wird, ist es schließlich möglich durch verschiedene Szenarien auf „spekulativem Wege“ (S. 266) [11] unterschiedliche Vorhersagen abzuleiten, wie beispielsweise die *Lichtablenkung am Gravitationsfeld* [11, S. 266; 29, S. 461] oder die *gravitationsbedingte Rotverschiebung* [30, S. 904].

Die wechselseitige Verbindung zwischen dem Äquivalenzprinzip und Machs Überlegungen wurde bereits von Hans Reichenbach betont: „Die Äquivalenz von Trägheit und Schwere ist die strenge Formulierung des Machschen Prinzips im engeren Sinne.“ (S. 240) [26]. In den Arbeiten von Mach fehlt jedoch ein mathematisch-physikalisches Konzept, das die Äquivalenz von Energie und Masse ($E = m \cdot c^2$) deutlich macht.

Ein weiterer, potenzieller Einfluss von Mach auf Einstein in diesem Zusammenhang besteht vielleicht darin, dass Einstein für sein Gedankenexperiment, das für die Entwicklung des Äquivalenzprinzips von großer Bedeutung war, möglicherweise durch Mach inspiriert wurde. Dieser Gedanke ist besonders naheliegend, da Mach einer der Wegbereiter bei der Erforschung und Anwendung von Gedankenexperimenten war [31]. Tatsächlich findet sich in Machs Buch *Mechanik* [8, S. 234] ein ähnliches Gedankenexperiment, wie bereits von mehreren Autoren angemerkt wurde. Aus wissenschaftshistorischer Sicht gibt es keinen überzeugenden Grund, diese Perspektive abzulehnen. Die genauen Daten erlauben es uns jedoch bedauerlicherweise nicht, eindeutig festzustellen, ob Einstein tatsächlich von Mach für sein Gedankenexperiment inspiriert wurde.

3.3. Relativistische Kosmologie

Es ist allgemein bekannt, dass sich Einstein ab 1915/16 unter anderem mit kosmologischen Problemen befasste. In diesem

Zusammenhang beschäftigte er sich mit den Randbedingungen des Universums in der relativistischen Kosmologie und insbesondere mit dem Trägheitskonzept von Mach, das heute als das *Mach'sche Prinzip* bekannt ist. Es sei angemerkt, dass Einstein den Begriff des Mach'schen Prinzips (1918) zwei Jahre nach Machs Tod (1916) selbst in die theoretische Physik einführte [32, S. 241, Fn. 1]. Gemäß Mach kann die Trägheitsbewegung eines Körpers auf die übrigen Massen im Universum zurückgeführt werden:

„Das Verhalten der irdischen Körper gegen die Erde lässt sich auf deren Verhalten gegen die fernen Himmelskörper zurückführen. Wollten wir behaupten, dass wir von den bewegten Körpern mehr kennen als jenes durch die Erfahrung nahe gelegte hypothetische Verhalten gegen die Himmelskörper, so würden wir uns einer Unehrlichkeit schuldig machen. Wir müssen sogar dem Gedanken Raum geben, dass die Massen, die wir sehen und nach welchen wir uns zufällig orientieren, vielleicht gar nicht die eigentlich entscheidenden sind.“ (S. 262) [8]

Aufgrund der neueren Entwicklung in der Kosmologie – zum Beispiel die Dunkle Materie und die Dunkle Energie [33] – müssen wir inzwischen solchen Gedanken Raum geben. Offensichtlich verstand Mach seinen Vorschlag als ein hypothetisches Konzept, welches die empirische Erfahrung nahelegt, oder zumindest nicht ausschließen kann. Er betrachtet seine Darstellung daher nicht als eine unumstößliche Gewissheit, sondern vielmehr als eine mögliche alternative Erklärung, die dazu dient, Argumente gegen die Idee eines absoluten Raumes, einer absoluten Zeit oder einer absoluten Bewegung vorzulegen. Sein Ziel ist es, die Physik von dogmatischen Ansichten zu befreien und einen vorurteilsfreien Fortschritt zu ermöglichen.

Über einen gewissen Zeitraum hinweg versuchte Einstein, das Mach'sche Prinzip entsprechend seiner eigenen Interpretation in seine kosmologischen Überlegungen zu integrieren [34]. Die

Frage, inwieweit die endgültige Allgemeine Relativitätstheorie im Einklang mit Machs Vorstellungen steht, war und ist Gegenstand anhaltender Diskussion [36]. Es scheint vorerst eine persönliche Entscheidung zu sein, ob man das Mach'sche Prinzip als ein Auswahlprinzip akzeptieren möchte oder nicht.

4. Fazit

Von einer didaktischen Perspektive aus betrachtet, könnte sich Machs ursprüngliche Vorstellung möglicherweise über die Grenzen der Relativitätstheorie hinaus erstrecken – vielleicht kann sie sogar als eine wissenschaftliche Methode betrachtet werden, die bei der Gestaltung unseres Weltbildes hilft, wie er erklärt: „In der Tat kann die Naturwissenschaft durch bloße Beachtung des *Einzelnen* nichts erreichen, wenn sie nicht zeitweilig auch den Blick ins Große richtet.“ (S. 486) [8]. In ähnlicher Weise vollzog Einstein eine Verbindung zwischen den *einzelnen* Gebieten der Physik, indem er Elektrodynamik und Mechanik zu einem umfassenderen Konzept vereinte (SRT). Anschließend dehnte er die Relativitätstheorie auf die Gravitation aus (ART) und ermöglichte somit eine Beschreibung des Kosmos. Das Ziel war stets das *Große und Ganze* zu erfassen. Diese Zugangsweise ist mittlerweile zu einem wesentlichen Bestandteil des wissenschaftlichen Weltbildes geworden, in dem man ständig bemüht ist, die Elementarteilchenphysik und die Kosmologie miteinander in Einklang zu bringen.

Auf diese Weise wird auch Machs historisch-kritische Herangehensweise verständlich, bei der spezifische Themen aus verschiedenen geschichtlichen Perspektiven betrachtet werden, um ein umfassenderes Bild zu erhalten. Das Duo – Mach als Kritiker der klassischen Mechanik und Einstein als Begründer der Relativitätstheorie – hat zweifellos eine äußerst erfolgreiche Physikgeschichte geschrieben, die hoffentlich kommenden Generationen als inspirierende Quelle [13] dienen kann.

Eren Simsek *Institution, Teilorganisation*

Literatur

- [1] Reich, K. (1977). Theorien der Allgemeinen Didaktik. Zu den Grundlinien didaktischer Wissenschaftsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland und in der Deutschen Demokratischen Republik. Stuttgart: Ernst Klett Verlag.
- [2] Klafki, W. (2019). Kritisch-konstruktive Didaktik und Hermeneutik. In: Allgemeine Erziehungswissenschaft. Systematische und historische Abhandlungen. Wiesbaden: Springer VS, S. 85-99.
- [3] Woitkowski, D. & Vogelsang, C. (Hrsg.) (2021). Zentrale Themen der Ideengeschichte physikdidaktischer Forschung in Deutschland anhand ausgewählter Originalquellen. Berlin: Logos Verlag, S. 55-58.
- [4] Höttecke, D. & Schecker, H. (2021). Unterrichtskonzeptionen für Nature of Science (NOS). In: Wilhelm, T., Schecker, H., Hopf, M. (Hrsg.) Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- [5] Zeilinger, A. (2004). Einsteins Schleier: Die neue Welt der Quantenphysik. München: C. H. Beck.
- [6] Mach, E. (1872). Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Vortrag gehalten in der k. Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften am 15. November. Prag: Calve.
- [7] Mach, E. (1896). Die Prinzipien der Wärmelehre: Historisch-kritisch entwickelt. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- [8] Mach, E. (2012). Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt. Berlin: Xenomoi.
- [9] Wolters, G. (1987). Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Berlin: Walter de Gruyter, S. 149-153.
- [10] Einstein, A. (1916). Ernst Mach. Physikalische Zeitschrift. 17. Jahrgang.

- [11] Janssen, M., et al. (2002). *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 7: The Berlin Years: Writings, 1918–1921*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2002.
- [12] Das erkennt man bereits aus den Prinzipien der SRT. Das 1. Postulat (Relativitätsprinzip) hat ihren Ursprung in der Mechanik und das 2. (Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) kommt aus der Elektrodynamik. (Wobei man natürlich sagen kann, dass vor allem das mechanische Weltbild durch die SRT aufgehoben wurde.)
- [13] Simsek, E. (2022). *Einsteins Relativitätstheorie – ihre Entstehung und Machs Einfluss darauf*. Berlin, Heidelberg: B. Metzler.
- [14] Wieso es diese Analogie überhaupt gab, ist natürlich ebenso eine wichtige und interessante Frage, die man näher untersuchen könnte. Meine Vermutung ist, dass es dafür (unter anderem) zwei wichtige Punkte gab: I.) Sowohl Licht- als auch Schallwellen zeigen Beugungs- bzw. Interferenzmuster auf. II.) Man ging wohl von einer Analogie zwischen Hör- und Sehsinn aus.
- [15] Mach, E. (1873). *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbänderungen durch Bewegung. Gesammelte Abhandlungen*. Prag: J.G. Calve'sche Buchhandlung.
- [16] z. B. Mach, E. (1904). Objektive Darstellung der Interferenz des polarisierten Lichtes. In: S. Meyer, ed. *Festschrift Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, S. 441–447.
- [17] z. B. Cohn, E. (1904). Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. Jahrgang 1904a. Zweiter Halbband. Juli bis December*. Berlin: Verlag der königlichen Akademie der Wissenschaften, S. 1294–1303.
- [18] Stachel, J. et al. (1987). *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 1: The Early Years, 1879–1902*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- [19] Sexl, R. U. (1985). Der unerschöpfliche Albert Einstein. In: A. P. French, ed. *Albert Einstein Wirkung und Nachwirkung*. Braunschweig: Vieweg & Sohn, S. 36-37.
- [20] Embacher, F. (o.J.). *Spezielle Relativitätstheorie*. <https://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/SRT/Lorentztransformation.html> [Zugriff am 3. August 2020].
- [21] Cohn, E. (1913). *Physikalisches über Raum und Zeit. Zweite, verbesserte Auflage* ed. Leipzig/Berlin: B.G. Teubner.
- [22] Seine Geste ist kohärent, da Ernst Mach in seinen Veröffentlichungen zu Lebzeiten die SRT als wegweisend betrachtete und sie mit seinen eigenen Ansichten in Verbindung brachte – siehe z. B.: Mach, E. (1910). *Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe*. In: *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*. Bonn: Martin Hager, S. 264, Fn. 1.
- [23] Klein, M. J., et al. (1995). *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 4: The Swiss Years: Writings, 1912–1914*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- [24] Haubold, H. J. & Yasui, E. (1986). Jun Ishiwaras Text über Albert Einsteins Gastvortrag an der Universität zu Kyoto am 14. Dezember 1922 (Eine Übersetzung aus dem Japanischen). *Archive for History of Exact Sciences*, 36(3).
- [25] z. B.: Einstein, A. (1983). *Autobiographisches*. In: P. A. Schilpp, ed. *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher – eine Auswahl*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn, S. 10, 24–26.
- [26] Reichenbach, H. (1928). *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. Berlin/Leipzig: Walter de Gruyter & Co.
- [27] Wien, W. (1898). Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen. *Annalen der Physik*, S. I–XVIII.
- [28] Planck, M. (1908). Zur Dynamik bewegter Systeme. *Annalen der Physik*, Volume 26, S. 1–32.
- [29] Einstein, A. (1907). Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, Volume 4.
- [30] Einstein, A. (1911). Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik*, Volume 35.
- [31] Mach, E. (1897). Über Gedankenexperimente. Sonder-Abdruck aus der: *Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht*. Zehnter Jahrgang. Berlin: Julius Springer.
- [32] Einstein, A. (1918). Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, Volume 55.
- [33] Ironischerweise besteht eine historische Verbindung zwischen dem Mach'schen Prinzip und der kosmologischen Konstante, die zur Beschreibung der dunklen Energie verwendet wird – siehe [13, S. 298-302].
- [34] z. B. Einstein, A. (1919). Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle? *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, S. 353–356.
- [35] z. B. Barbour, J., Pfister, H. (1995). *Mach's principle: From Newton's bucket to quantum gravity*. Boston, Basel, Berlin: Birkhäuser, S. 214–236; und [13, S. XVII–XXII].