

Interferenzen mit Mach 2

Ernst Mach und sein Sohn Ludwig bildeten ein ambivalentes Forscherduo.

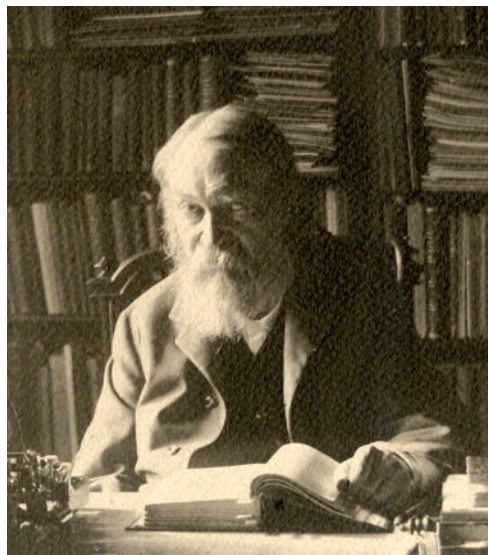
Wilhelm Füßl und Johannes-Geert Hagmann

Dass Ernst und Ludwig Mach auch gemeinsam physikalische Forschung betrieben, ist eine weithin unbekannt Episode der Wissenschaftsgeschichte. Ludwig Mach blieb stets – nicht immer zu Recht – im Schatten seines Vaters. Ernst Mach entfaltet als vielseitige Forscherpersönlichkeit auch einhundert Jahre nach seinem Tod anhaltende Wirkung. Grund genug, sich dem Vater-Sohn-Gespann im Lichte ihrer wissenschaftlichen Nachlässe zu nähern.

In der Wissenschaft gab es immer wieder Beispiele für Forscherinnen und Forscher, die ihre Begabungen und Leidenschaften an die nächste Generation weitergeben konnten. Man denke nur an die Familie Curie oder Gespanne aus Vater und Sohn, die entweder gemeinsam oder einzeln den Nobelpreis erhielten wie William Henry und William Lawrence Bragg, Niels und Aage Bohr oder J. J. (Joseph John) und George Paget Thomson.

Dass bei den Machs heute nur ein Name dominiert, hat verschiedene Gründe. Ernst Mach (1838 – 1916) hat in seiner wissenschaftlichen Laufbahn eine bemerkenswerte Vielseitigkeit an den Tag gelegt. Seine umfangreichen Schriften entfalten eine bis heute anhaltende akademische Wirkung, und die „Mach-Zahl“ für das Verhältnis der Bewegungsgeschwindigkeit von Objekten zur Schallgeschwindigkeit ist ein fest etablierter Begriff.

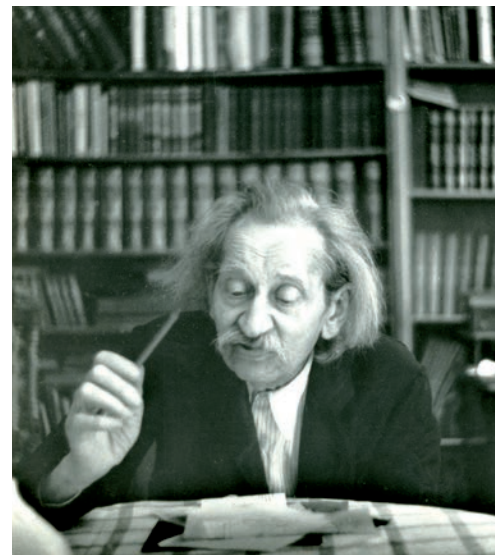
Ernst Mach war nicht nur ein vielgerühmter Lehrer und Experimentator, sondern auch bahnbrechender Forscher auf unterschiedlichen physikalischen Gebieten sowie in Physiologie und Psychologie. Er beschäftigte sich zeitlebens außerdem mit wissenschaftstheoretischen Fragen. Seine Forschung war bei den Zeitgenossen aber nicht



Diese Fotos von Ernst Mach (links) und seinem ältesten Sohn Ludwig zeigen beide in ihren späten

immer unumstritten. Trotzdem erfuhr er schon zu Lebzeiten breite Anerkennung, die in einer Fülle von Ehrungen zum Ausdruck kam. Eine von Fachkollegen 1910 angestrebte Verleihung des Nobelpreises für Physik kam jedoch nicht zustande.

Der Name seines Sohnes Ludwig Mach (1868 – 1951) ist in der Forschung dagegen kaum präsent. Lediglich der Philosoph und Wissenschaftshistoriker Gereon Wolters hat ihm in seiner Habilitationsschrift breiten Raum eingeräumt. Das ominöse Vorwort der posthum im Jahre 1921 erschienenen „Prinzipien der physikalischen Optik“ von Ernst Mach, in denen Kritik an der Relativitätstheorie geübt wird, hat er als eine Fälschung des Sohnes Ludwig entlarvt [1]. Seine Einschätzung von Ludwig Mach als kokain-süchtiger Fälscher verdeckte jedoch einige wissenschaftshistorisch hoch spannende Aspekte: die jahrelange intensive Zusammenarbeit von Vater und Sohn, die durchaus eigenständigen Leistungen Ludwigs und die angemaßte Deutungshoheit des Sohnes über die Forschungsergebnisse des Vaters bis hin zur Aneig-



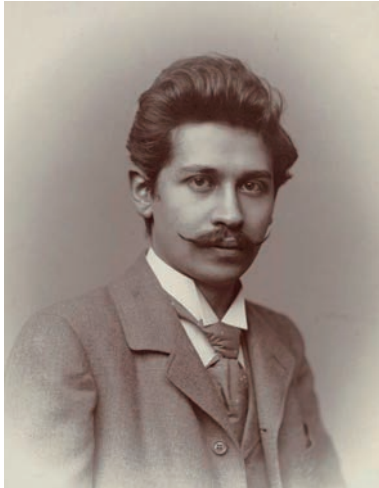
Jahren und in einer erstaunlich ähnlichen Inszenierung, die möglicherweise beabsichtigt war.

nung von dessen wissenschaftlichen Ideen. Fälschlicherweise wird die Entwicklung des „Interferenz-Refractometers“, die Ernst Mach allein seinem Sohn zusprach, in der Literatur oft dem Vater zugewiesen. Dabei hatte Ludwig Mach in verschiedenen Abhandlungen über seine Entwicklung berichtet [2]. Dass sich Ludwig Mach sein Leben lang stets im Schatten des vielbeachteten Vaters sah, aus dem er nie richtig hervortreten konnte, verwundert daher nicht. Auch sind nicht allzu viele Fotografien von ihm bekannt.

Wie der Vater, so der Sohn?

Ernst Mach wurde 1838 in Chirlitz-Turas bei Brünn geboren [3]. Nach seinem Studium der Physik, Mathematik und Philosophie an der Universität Wien führte ihn seine akademische Laufbahn, nach einem kurzen Zwischenspiel in Graz, im Jahr 1867 zunächst an die Universität in Prag, wo er fast dreißig Jahre lang forschte und lehrte. Aus dieser Zeit stammen viele seiner bedeutenden physikalischen Arbeiten.

Dr. Wilhelm Füßl
und Dr. Johannes-Geert Hagmann,
Deutsches Museum,
Museumsinsel 1,
80538 München



Der junge Ludwig Mach im Fotoporträt, das zwischen 1890 und 1900 entstanden sein dürfte.

Studium 1895 mit der Promotion ab. Anders als sein berühmter Vater schlug Ludwig Mach keine akademische Laufbahn ein. Nach seiner Promotion fand er „durch die Freundlichkeit des Herrn Professor Abbe“ zunächst eine Anstellung bei Carl Zeiss in Jena.¹⁾ Nach wenigen Jahren verließ er die Stadt, um sich der Verwertung eines 1898 von ihm erworbenen, sehr allgemeinen Patents für eine Aluminium-Magnesium-Legierung zu widmen. Allerdings konnte sich die unter dem Namen „Magnalium“ durch mehrere Gesellschaften verwertete Legierung trotz vielversprechender mechanischer Eigenschaften aufgrund ihres geringen Korrosionswiderstands nicht kommerziell durchsetzen [4]. Ludwig Mach schlug sich finanziell mehr schlecht als recht als selbstständiger Erfinder durch, der auch mit mittelständischen Unternehmen zusammenarbeitete.²⁾

Während des Studiums hatte er auch physikalische und mathematische Vorlesungen gehört. In den Ferien half er zudem bei den Versuchen seines Vaters. Weil Ludwig Mach Themengebiete seines Vaters übernahm und erweiterte, wurde er Stück für Stück in die experimentelle Forschung eingeführt. Trotz manchem Tadel erarbeitete er sich schließlich die Anerkennung

seines Vaters für seine experimentellen Fähigkeiten. Ludwig Machs erste Einträge in seine Versuchs-„Kladde“, die in seinem Nachlass erhalten ist und – mit großen Lücken in späteren Jahren – Aufschluss über einige seiner experimentellen Arbeiten gibt, befassen sich mit den Schießversuchen und ihrer fotografischen Aufnahme durch Ernst Mach und seinen Kollegen Peter Salcher im Jahr 1887.

Interferenzen ...

Bereits 1889 publizierten Vater und Sohn drei gemeinsame Arbeiten in den Sitzungsberichten der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, der Ernst Mach seit 1860 als korrespondierendes und seit 1880 als wirkliches Mitglied angehörte. Darunter fanden sich auch Versuche zur optischen Untersuchung von Schallwellen, die Ernst Mach mit einem anderen Medizinstudenten begonnen hatte, der jedoch infolge eines Unfalls mit einer Petroleumlampe verstorben war. In den Artikeln hob Ernst Mach seine Planung der Versuche hervor, die oft eine Fortsetzung von älteren Arbeiten darstellten, während er Ludwigs Anteil bei der Durchführung und dem mechanischen Geschick zur Verbesserung und Erweiterung

1) Ludwig Mach an Viktor Schumann, 10. Juli 1896; Nachlass Schumann, Universitätsbibliothek Leipzig Sondersammlungen

2) Patente von Ludwig Mach, u. a. D.R.P. 105502 (12. November 1898), D.R.P. 487762 (20. Juli 1927), D.R.P. 676896 (16. Juni 1936)

1895 wechselte Ernst Mach nach Wien auf eine Professur für Philosophie. Durch einen Schlaganfall erlitt er 1898 eine partielle Lähmung, worauf er seine Professur aufgab und schließlich in den letzten drei Jahren seines Lebens von 1913 an zu seinem ältesten Sohn Ludwig nach Vaterstetten bei München zog.

Mit seiner Frau Louise Marussig (1845 – 1919) hatte Ernst Mach fünf Kinder: Ludwig, Caroline, Heinrich, Felix und Viktor. Einzig Ludwig sollte ernsthafte Bestrebungen unternehmen, als Forscher in die Fußstapfen seines Vaters zu treten. Ab 1887 studierte er Medizin an der Universität in Prag und schloss sein

ZUR GESCHICHTE DES MACH-ZEHNDER-INTERFEROMETERS

Jules Jamin, Physikprofessor an der École Polytechnique, entwickelte 1856 ein Interferenz-Gerät aus zwei Spiegeln, die auf der Rückseite von dicken Glasscheiben aufgebracht waren. Beim **Jamin-Interferometer** dienen die sich gegenüberliegenden Scheiben sowohl als Oberfläche für die Spiegel als auch als Strahlteiler. Jamin schlug diesen Aufbau als Verbesserung und Vereinfachung gegenüber dem **differentiellen Refraktometer** von François Arago vor. Das Jamin-Interferometer diente in der Folge als Inspiration für viele andere Aufbauten.

1870 hatte Ernst Mach Versuche mit dem Jamin-Interferometer als Hilfsmittel zur Visualisierung akustischer Wellen in Pfeifen unternommen. Dabei griff Mach auf Ergebnisse einer eindrucksvollen Reihe von Experimenten der Physiker August Toepler und Ludwig Boltz-



Interferometer von Ludwig Mach

mann zurück. Ludwig Mach widmete sich im Zuge der ballistischen und akustischen Fotografien erneut der interferometrischen Abbildungstechnik. Nach eigenen Angaben arbeitete Ludwig bereits an einer Veränderung des Aufbaus mit separierten Spiegeln und Strahlteilern, als im Juli 1891 für ihn unerwartet

ein unabhängiger Artikel des Schweizer Forschers Ludwig Zehnder in der Zeitschrift für Instrumentenkunde erschien, der die gleiche Modifikation vorwegnahm. Das zwang Ludwig Mach dazu, seine eigene Arbeit mit der Unterstützung seines Vaters rasch in Form einer Kurzmittteilung zu veröffentlichen [2]. Aufgrund der unabhängigen zeitgleichen Entwicklung wird der Vier-Platten-Aufbau heute als **Mach-Zehnder-Interferometer** bezeichnet.

Aus dem Laborbuch von Ludwig Mach ist nicht klar erkennbar, wann er mit den Arbeiten am Interferometer begann. Die ersten systematischen Versuche mit dem Instrument sind darin ab 1893 beschrieben. In der Kurzmittteilung von November 1891 stellte jedoch sein Vater klar, dass es sich um eine von seinem Sohn „erdachte“ und „ausgeführte“ Modifikation handelt.



Ernst Mach in der Prager Vorlesungssammlung, ca. 1875

der Versuche sowie zur Herstellung von Fotografien betonte.

In den 1890er-Jahren trat Ludwig Mach erstmals als alleiniger Autor in den Akademieberichten auf. Es erschienen seine ersten Arbeiten zum „Interferenz-Refractometer“, einer Erweiterung des Jamin-Interferometers mit vier Platten. Heute ist es unter dem Namen Mach-Zehnder-Interferometer bekannt (**Infokasten**) und ein grundlegendes Instrument für die Messtechnik und die Quantenoptik. Es besteht aus einem Stativ Aufbau mit zwei Spiegeln und zwei halbdurchlässigen Glasplatten, die sich in einem Rechteck gegenüberstehen. Einfalles Licht wird von der ersten Glasplatte in zwei Bündel geteilt, die anschließend unterschiedliche Wege im Interferometer nehmen. Durch die beiden Spiegel werden die Teilbündel auf dem zweiten Strahlteiler wiedervereint und zu einem Interferenzmuster überlagert. Auf diese Weise lassen sich Unterschiede zwischen den beiden Wegen der Teilbündel von der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts, also weniger als ein Tausendstel Millimeter, messen.

Feine Unterschiede in der Dichte der Luft, die sich auf den beiden Teilstrecken befindet, verändern das Streifenmuster sichtbar. Sie werden beispielsweise durch Änderungen des Drucks oder der Temperatur hervorgerufen. So mag es nicht verwundern, dass Ludwig und Ernst Mach als eine der ersten Anwendungen der Technik die Untersuchung von

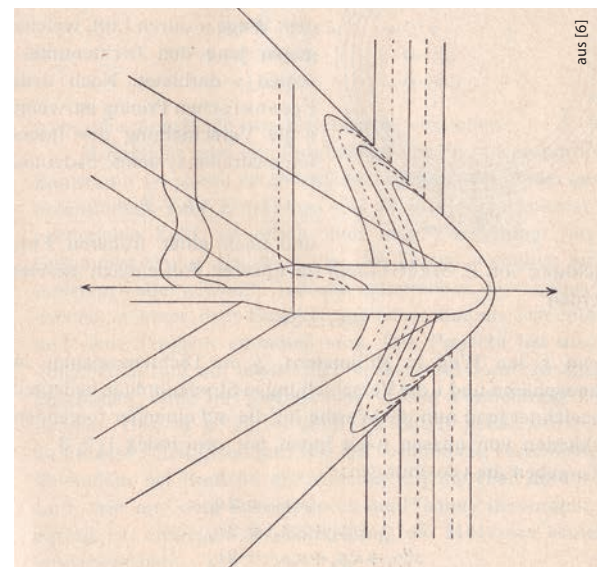
Druckwellen fliegender Geschosse wählten. Geschossfotografien hatten Ernst Mach, der Physiker und Fotopionier Peter Salcher und Ludwig Mach zuvor bereits mit der Schlierentechnik aufgenommen. Die gestochen scharfen Bilder schnell fliegender Gewehrkugeln weckten rasch das Interesse militärischer Akademien und der Industrie. Die interferometrische Methode, die vor allem Ludwig Mach verfeinert hatte, bot den Vorteil, dass sie neben den aussagekräftigen Bildern der Projektile auch quantitative Aussagen zu Druckwellen und Druckverlauf lieferte. Die Interferometrie wurde rasch zum Standard für die ballistische Forschung und später ein fester Bestandteil der Bildgebung von Windkanälen.

... und Irritationen

Der direkten Konsequenzen ihrer Projektile-Forschungen waren sich beide Machs bewusst, und Ernst Mach bemerkte im Jahr 1897 kritisch [5]: „Die Menschen fühlen sich heutzutage verpflichtet, zuweilen für recht fragwürdige Ziele und Ideale sich gegenseitig in kürzester Zeit möglichst viele Löcher in den Leib zu schießen. Und ein anderes Ideal, welches zu dem vorgenannten meist in schärfstem Gegensatz steht, gebietet ihnen zugleich, diese Löcher von kleinstem Caliber herzustellen, und die hergestellten möglichst rasch wieder zu stopfen und zu heilen.“

Obleich aufgrund Ludwig Machs Beitrag zur Entwicklung des Interferometers klar sein müsste, welcher Mach in „Mach-Zehnder“ gemeint ist, wirkt der lange Schatten von Ernst Mach, den Ludwig Mach zu Lebzeiten stets beklagte, hier deutlich nach. In Teilen der Sekundärliteratur wurden und werden Ernst Mach und Ludwig Mach in ihrer Rolle zur Entwicklung des Instruments verwechselt, auch von Historikern. So wird in einer frühen Auflage des vielleicht bekanntesten Werks von Max Born, der „Optik“ (1933), Ludwig Mach kurz und bündig unter „E. Mach“ subsumiert.

Neben der externen Vermerkung der wissenschaftlichen Leistungen von Vater und Sohn haben beide jedoch selbst aktiv dazu beigetragen, dass auch in weiteren Arbeiten die nachträgliche Zuschreibung der konzeptionellen und experimentellen Leistungen nicht ohne Weiteres möglich ist. Hinter Teilen des Artikels „Optische Untersuchungen der Luftstrahlen“ von Ludwig Mach aus dem Jahr 1897 steht die Hand des Vaters, der jedoch bewusst darauf achtete, dass nur sein Sohn als Autor erschien. Im umgekehrten Fall versteckte sich



Fliegende Geschosse lassen sich interferometrisch abbilden (oben) und ihr Druckprofil im Streifenbild analysieren.

3) Deutsches Museum, München, Archiv, NL 174/1094 (Nachlass Ernst Mach)

der Sohn immer wieder hinter der Feder seines Vaters. Teils geschah das offen, etwa wenn Ernst Mach in einer Fußnote von der experimentellen Unterstützung durch Ludwig Mach berichtete, teils versteckt, etwa in einer der letzten unter dem Namen Ernst Machs veröffentlichten Arbeiten zu Versuchen mit einem Michelson-Interferometer aus dem Jahr 1915, die ausschließlich Ludwig Mach durchgeführt hatte. Und schließlich falschte Ludwig posthum das bereits erwähnte Vorwort zur „Optik“ seines Vaters.

„Plancks [...] Kritik zum Trotz“

Versucht man, die wissenschaftliche Lebensleistung Ernst Machs hundert Jahre nach seinem Tod zusammenfassend zu würdigen, dürfte es seine Vielseitigkeit sein, die ihn in besonderer Weise ausgezeichnet hat. Ernst Mach publizierte bis 1916 weit über 200 Arbeiten; hinzu kommen über 70 Übersetzungen. Auch nach seinem Tod wurden zahlreiche Werke neu aufgelegt. So erscheint seit 2008 eine Studienausgabe seines nahezu gesamten Werks. Ernst Machs Arbeitsgebiete reichen von der Physik, Physiologie und Psychologie bis hin zur Wissenschaftsgeschichte und -theorie. Großen Einfluss übte er auch auf den naturwissenschaftlichen Unterricht an weiterführenden Schulen aus. Sein Buch „Grundriß der Naturlehre“ fand in vielen Auflagen Verbreitung. Machs Denkansatz, dass bekannte Forschungsstände immer wieder weiterentwickelt und modifiziert werden müssten, führten ihn zur Kritik an der Newtonschen Massendefinition und zu seinem Postulat des Zusammenhangs von Trägheitsverhalten von Massen auf die Massenverteilung im Universum. Das führte zur Formulierung der Feldgleichungen in Einsteins Relativitätstheorie [3]. Albert Einstein hat dies in einem Brief an Ernst Mach vom 25. Juni 1913 so formuliert: „Nächstes Jahr bei der Sonnenfinsternis soll sich zeigen, ob die Lichtstrahlen an der Sonne gekrümmt werden, ob [mit anderen Worten] die zugrunde gelegte fundamentale

Annahme von der Aequivalenz des Bezugssystems einerseits und Schwerfeld andererseits wirklich zutrifft. Wenn ja, so erfahren Ihre genialen Untersuchungen über die Grundlagen der Mechanik – Plancks ungerechtfertigter Kritik zum Trotz – eine glänzende Rechtfertigung.“^[3] Wie sehr der Nobelpreisträger Ernst Mach schätzte, belegt sein Nachruf auf den Kollegen: „Es ist nicht unwahrscheinlich, dass Mach auf die Relativitätstheorie gekommen wäre, wenn in der Zeit, als er jugendfrischen Geistes war, die Frage nach der Bedeutung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit schon die Physiker bewegt hätte“ [8].

Im Nachlass vereint

Die Überlagerung der jeweiligen Lebensleistungen von Ernst und Ludwig Mach lässt sich auch deutlich an den Nachlässen der beiden Protagonisten zeigen. Ernst Mach, der im Jahr 1913 zu seinem Sohn Ludwig nach Vaterstetten bei München gezogen war, vermachte diesem testamentarisch seine Bibliothek und sämtliche Manuskripte [7]. Als Ludwig im September 1951 verstarb, hat das Münchner Antiquariat Theodor Ackermann die Bibliothek und den wissenschaftlichen Nachlass übernommen und über zwei Lagerkataloge 1959 und 1960 verkauft. Während die Bibliothek weitgehend zerstreut wurde, gelangte der wissenschaftliche Nachlass an das heutige Ernst-Mach-Institut für Kurzwelldynamik in Freiburg („Freiburger Bestand“) und 1998 an das Archiv des Deutschen Museums. Bei Ludwig Machs Witwe Anna Karma verblieben weitere Nachlassteile, die über Gottfried Ulsenheimer und die Brüder Peter und Jürgen Ohlendorf ihren Weg in das Philosophische Archiv der Universität Konstanz fanden ([1], S. 5f.). Von dort kamen diese Teile als „Konstanzer Abgabe“ Ende 2015 ebenfalls in das Archiv des Deutschen Museums.

Vom 9. Dezember 2016 bis 10. März 2017 zeigt eine Sonderausstellung im Deutschen Museum erstmals gemeinsam ausgewählte

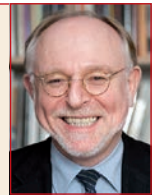
Exponate von Ernst und Ludwig Mach aus allen Beständen des Archivs, der Bibliothek und der Objektsammlungen. Neben der Darstellung der eng verwobenen wissenschaftlichen Arbeit der beiden Protagonisten sollen damit hundert Jahre nach Ernst Machs Tod auch die besonderen wissenschaftlichen Leistungen dieses vielseitigen Forschers gewürdigt werden.

Literatur

- [1] G. Wolters, Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Eine Fälschung und ihre Folgen, De Gruyter, Berlin (1987), S. 274
- [2] L. Mach, Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien **101**, 5 (1892) und **102**, 1035 (1893); L. Mach, Zeitschrift für Instrumentenkunde **12**, 89 (1892)
- [3] K. Hentschel, „Mach, Ernst“, in: Neue Deutsche Biographie **15** (1987), S. 605 und www.deutsche-biographie.de/gnd118575767.html#ndbcontent
- [4] R. Debar, Die Aluminium-Industrie, Wiesbaden (1925), S. 191
- [5] E. Mach, Über Erscheinungen an fliegenden Projectilen, in: E. Mach, Populärwissenschaftliche Vorlesungen, 3. Aufl., Leipzig (1903), S. 351
- [6] L. Mach, Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien **105**, 605 (1896)
- [7] W. Füßl und M. Prussat, Der Wissenschaftliche Nachlass von Ernst Mach (Veröffentlichungen aus dem Archiv des Deutschen Museums 4), München (2001), S. 15
- [8] A. Einstein, Physikalische Zeitschrift **17**, 101 (1916)

DIE AUTOREN

Wilhelm Füßl ist Historiker und leitet seit 1992 das Archiv des Deutschen Museums. Sein Forschungsinteresse gilt der Geschichte technischer Sammlungen und den Wechselwirkungen von Biografie und Technikgeschichte.



Johannes-Geert Haggmann (FV Geschichte der Physik, Didaktik der Physik) studierte Physik in Karlsruhe, Lyon und Sapporo. Seit 2009 ist er Kurator für Physik am Deutschen Museum. Zurzeit plant er die neue Dauerausstellung zur klassischen Optik.