Hermann von Helmholtz – zum 200. Geburtstag

Eine Würdigung des „Intellectual Giant“

Peter Költzsch, Martin Klemenz

Am 31. August 2021 jährte sich der Geburtstag von Hermann von Helmholtz zum 200. Mal. Aus diesem Anlass soll der folgende Artikel einen Einblick in die außergewöhnlichen Leistungen dieses Forschers geben. Vor allem werden dabei seine Erkenntnisse für das Fachgebiet der Akustik herausgestellt.
Größtenteils handelt es sich hierbei um Auszüge aus dem ersten Heft der DEGA-Schriftenreihe „Geschichte der Akustik“ [1], in dem ein ganzes Kapitel Helmholtz gewidmet ist.

Hermann von Helmholtz – on the occasion of his 200th birthday

The 31 August 2021 marked the 200th anniversary of Hermann von Helmholtz's birth. To honour this occasion, the following article will provide an insight into the extraordinary achievements of this researcher. Above all, his findings for the field of acoustics will be highlighted.
The majority of this article is composed of excerpts from the first issue of the DEGA publication series "Geschichte der Akustik" (History of Acoustics) [1], in which an entire chapter is dedicated to Helmholtz.

Einführung

Hermann von Helmholtz fasziniert noch heute, neben seiner Universalität im Bereich der Physiologie und Physik vor allem durch seine wissenschaftlichen Ergebnisse mit grundsätzlichem Charakter.
Zu Beginn seien zwei Zitate erwähnt. Albert Wangerin (deutscher Mathematiker, von 1906 bis 1921 Präsident der Leopoldina, d. h. der Kaiserlichen Leopoldinischen Carolinischen Akademie der Naturforscher) schrieb 1896: *„Helmholtz … gehörte zu den größten und tiefsten Forschern aller Zeiten, zu denen, die der Wissenschaft neue Bahnen gewiesen haben.“* Und ein Zeitgenosse von Helmholtz, James Clerk Maxwell (schottischer Physiker, bekannt u. a. durch die Maxwell-Gleichungen), merkte an: Helmholtz – *„the intellectual giant“*!

Abb. 1: Hermann von Helmholtz (Portrait 1894), Quelle: Wikimedia Commons.

Helmholtz war Forscher, Universitätsprofessor und Wissenschaftsorganisator. Die Liste seiner originären Leistungen in der Wissenschaft enthält u. a. die Reizleitungsgeschwindigkeit, den Augenspiegel, das Farbsehen und die räumliche Vorstellung, die Lösung meteorologischer Probleme, das Energieprinzip, Arbeiten zu den Hauptsätzen der Thermodynamik, das Prinzip der kleinsten Wirkung, Arbeiten zur Maxwell-Theorie in der Elektrodynamik, zum Verhältnis von Physik, Physiologie und Erkenntnistheorie, zur Ganzheit der Wissenschaft und zum Verhältnis zwischen Wissenschaft und Kultur. Von ihm stammen in der Akustik Arbeiten zur Klangfarbenanalyse, zur Theorie der Kombinationstöne, die Resonanztheorie des Hörens, und dann insbesondere die Arbeiten zu fundamentalen Gleichungen der Akustik und Strömungsmechanik (zur Wellengleichung, zum Greenschen Satz und der daraus folgenden Integralgleichung für Feldprobleme, zum Reziprozitätsgesetz, die Wirbelsätze und der Helmholtzsche Satz der Vektoranalysis und schließlich seine Arbeiten zur Ähnlichkeitsmechanik).

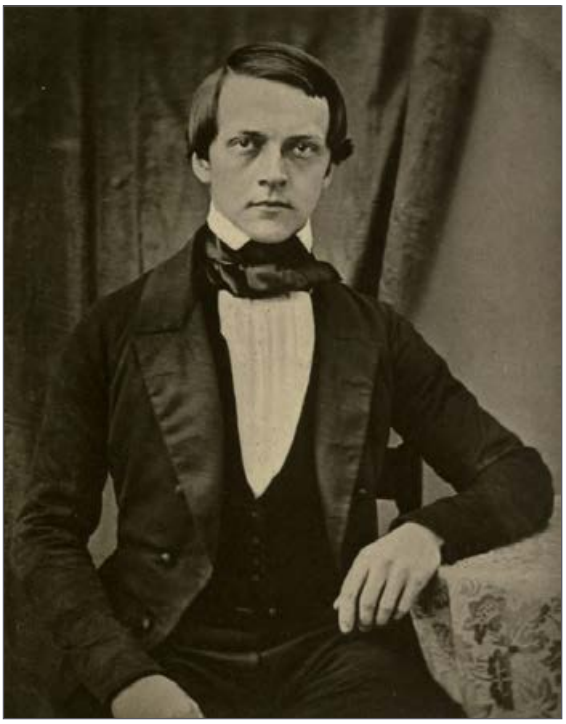


Abb. 2: Hermann von Helmholtz im Jahre 1848, Quelle: Wikimedia Commons.

Abb. 3: Hermann von Helmholtz im Jahre 1881, Gemälde von Ludwig Knaus (1829–1910), Quelle: Wikimedia Commons.

Werdegang und Lebenslauf

Hermann von Helmholtz wurde vor 200 Jahren am 31. August 1821 in Potsdam geboren. Er starb am 8. September 1894 in Berlin. Er war Naturforscher, Arzt, Physiologe, Physiker, aber auch Mathematiker und Philosoph.

Helmholtz studierte ab 1838 Medizin am „Medicinisch-chirurgischen Friedrich-Wilhelm-Institut“ in Berlin. Zu seinen Lehrern gehörten vor allem der Physiologe Johannes Müller und der Physiker Gustav Magnus. 1842 promovierte Helmholtz zum Doktor der Medizin, war dann als Militärarzt in Potsdam tätig und ab 1848 als Assistent am anatomischen Museum in Berlin und Anatomielehrer an der Berliner Kunstakademie. 1849 erhielt er eine Professur für Physiologie und Anatomie (Pathologie) an der Universität Königsberg. Dort habilitierte er sich 1852 mit der Abhandlung „Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben“. Seinen Habilitationsvortrag hielt er am 28. Juni 1852 zum Thema „Über die Natur der menschlichen Sinnesempfindungen“. 1855 folgte er einem Ruf an die Universität Bonn; er lehrte dort Anatomie und Physiologie.

1858 erhielt er die Professur für Physiologie an der Universität Heidelberg. Diese Zeit war gemeinsam mit dem Chemiker Robert Bunsen und dem Physiker Gustav Kirchhoff außerordentlich fruchtbar für die Naturwissenschaften, bei Helmholtz insbesondere für die Physiologie. In der Folgezeit lehnte Helmholtz zahlreiche Rufe auf bedeutende Lehrstühle ab: 1865 Universität Wien, 1868 Universität Bonn, 1871 Cambridge. Schließlich folgte er 1871 einem Ruf als Professor für Physik an die Friedrich-Wilhelms-Universität in Berlin (als Nachfolger seines Lehrers Gustav Magnus). Von 1877 bis 1878 übte er das Amt des Rektors der Berliner Universität aus; im Zeitraum nach 1876 entstand das neue Physikalische Institut der Berliner Universität am Reichstagsufer in Berlin. Am 28. Januar 1883 wurde ihm durch den Deutschen Kaiser Wilhelm I. der erbliche Adelstitel verliehen. Von 1888 bis 1894 fungierte er als erster Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin. Helmholtz war von 1849 bis 1859 mit Olga von Velten verheiratet; aus dieser Ehe gingen zwei Kinder hervor. Nach dem Tode seiner Frau heiratete er 1861 Anna von Mohl; mit ihr hatte er drei Kinder. Seine Frau Anna organisierte in Berlin einen Salon als „Treff der geistigen Elite Berlins“. Helmholtz starb am 8. September 1894 in Berlin.

Zur Charakterisierung von Helmholtz und seiner wissenschaftlichen Arbeit werden einige Zitate aus der nachdenklichen Tischrede von Helmholtz anlässlich der Feier seines 70. Geburtstages 1891 in Berlin angefügt (aus [2]):

„Ich stürzte mich mit Freude und großem Eifer auf das Studium aller physikalischen Lehrbücher, die ich in der Bibliothek meines Vaters fand. Es waren sehr altmodische .... Ich muss gestehen, dass ich manches Mal, wenn die Klasse Cicero oder Virgil las, welche beide mich

höchst langweilten, unter dem Tische den Gang der Strahlenbündel durch Teleskope berechnete und dabei schon einige optische Sätze fand, von denen in den Lehrbüchern nichts zu stehen pflegte ....“

„Dieser Trieb, den ursächlichen Zusammenhang der Erscheinungen zu entdecken, hat mich durch mein Leben geführt, und seine Intensität war auch wohl daran Schuld, dass ich keine Ruhe bei scheinbaren Auflösungen eines Problems fand, so lange ich noch dunkle Punkte darin fühlte.“

„Nun sollte ich zur Universität übergehen. Die Physik galt damals noch für eine brodlose Kunst. Meine Eltern waren zu großer Sparsamkeit gezwungen; also erklärte mir der Vater, er wisse mir nicht anders zum Studium der Physik zu helfen, als wenn ich das der Medicin mit in den Kauf nähme.“

„Diese Arbeiten genügten, um ... mir den Ruf ... nach Berlin und gleich darauf den an die Universität Königsberg zu verschaffen. Die militärärztlichen Behörden willigten in dankenswerther Liberalität in die Aufhebung meiner Verpflichtung zu weiterem Militärdienst, um mir den Uebergang in eine wissenschaftliche Stellung möglich zu machen.“

„Auch bin ich im Stande gewesen, einige mathematisch-physikalische Probleme zu lösen, und darunter sogar solche, an welchen die großen Mathematiker seit Euler sich vergebens bemüht hatten, z. B. die Fragen über die Wirbelbewegungen und die Discontinuität der Bewegung in Flüssigkeiten, die Frage über die Schallbewegung an den offenen Enden der Orgelpfeifen u.s.w. Aber der Stolz, den ich über das Endresultat in diesen Fällen hätte empfinden können, wurde beträchtlich herabgesetzt dadurch, dass ich wohl wusste, wie mir die Lösungen solcher Probleme fast immer nur durch allmählich wachsende Generalisationen von günstigen Beispielen, durch eine Reihe glücklicher Einfälle nach mancherlei Irrfahrten gelungen waren. Ich musste mich vergleichen einem Bergsteiger, der, ohne den Weg zu kennen, langsam und mühselig hinaufklimmt, oft umkehren muss, weil er nicht weiter kann, der bald durch Ueberlegung, bald durch Zufall neue Wegspuren entdeckt, die ihn wieder ein Stück vorwärts leiten, und endlich, wenn er sein Ziel erreicht, zur seiner Beschämung einen königlichen Weg findet, auf dem er hätte herauffahren können, wenn er gescheidt genug gewesen wäre, den richtigen Anfang zu finden. In meinen Abhandlungen habe ich natürlich den Leser dann nicht von meinen Irrfahrten unterhalten, sondern ihm nur den gebahnten Weg beschrieben, auf dem er jetzt ohne Mühe die Höhe erreichen mag.“

„Der Staat, der mir Unterhalt, wissenschaftliche Hülfsmittel und ein gut Theil freier Zeit gewährte, hatte meines Erachtens dadurch ein Recht zu verlangen, dass ich in geeigneter Form Alles, was ich mit seiner Unterstützung gefunden hatte, frei und vollständig meinen Mitbürgern mittheile.“

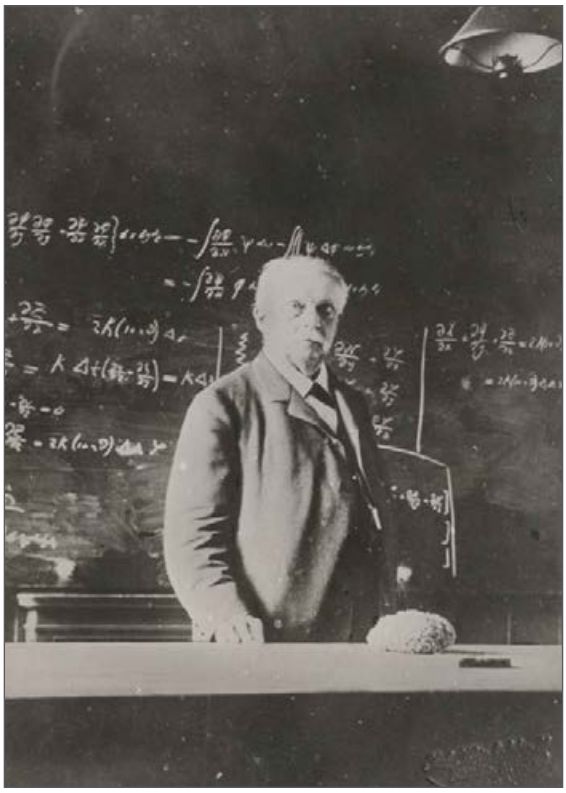


Abb. 4: Hermann von Helmholtz während seiner letzten Vorlesung am 7. Juli 1894 im kleinen Hörsaal des Physikalischen Instituts in Berlin, Quelle: Universitätsarchiv Heidelberg (mit freundlicher Genehmigung).

Helmholtz als Forscher und Wissenschaftsorganisator

Die Forschungsgebiete von Helmholtz entwickelten sich von der Medizin über die Physiologie und Mathematik hin zur Physik, Musik und Philosophie. Sein Überblick über die Fachgebiete Physiologie und Physik war universal; seine Verknüpfungen zwischen beiden Gebieten, einschließlich der Mathematik, brachten originäre, geniale wissenschaftliche Erkenntnisse.

Er schreibt dazu 1868: *„Die Physik war eigentlich von jeher die Wissenschaft, der sich mein Interesse hauptsächlich zugewendet hat. Was ich in der Physiologie hauptsächlich geleistet hatte, basiert wesentlich auf physikalischem Boden.“*

Und Gotthilf-Eugen Goldstein (deutscher Physiker, Entdecker der Kanalstrahlen) erinnert sich 1921: *„Ich habe keinen Lehrer gehabt, der mit größerer Gewissenhaftigkeit und Hingabe den übernommenen Aufgaben auch im Laboratoriumsunterricht nachkam, als Helmholtz. Er erschien im Laboratorium täglich um 10 Uhr und blieb, abgesehen von der Kollegstunde, dort bis 4 Uhr.“*

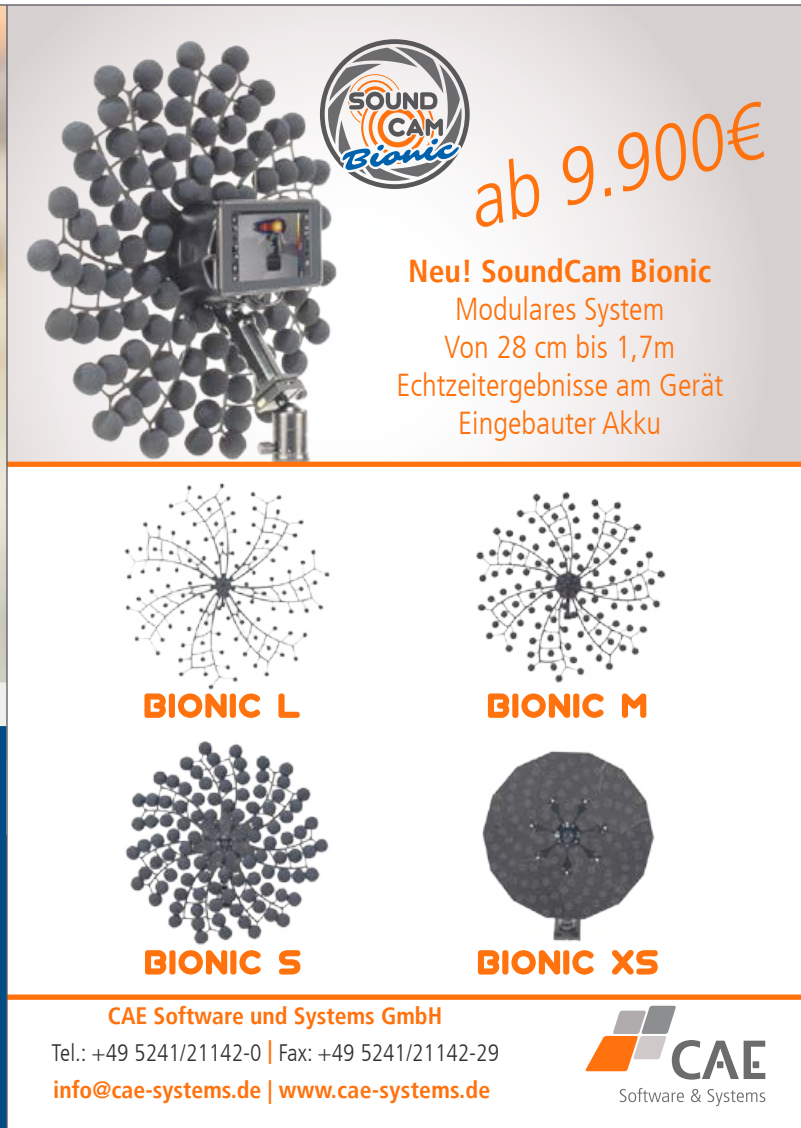
1876/1878 wird das modernste und kostspieligste Physikalische Institut der damaligen Zeit am Reichstagsufer in Berlin gebaut und eingeweiht, der sog. „Palast der Physik“. Im gleichen Gebäude war auch das Physiologische Institut von Emil du Bois-Reymond, einem Kommilitonen von Helmholtz aus der

Berliner Studienzeit, untergebracht. 1886 sagte der irische Physiker und Akustiker John Tyndall zu dem neuen Helmholtzschen Physikinstitut in Berlin: *„Sie werden im Berliner Laboratorium alle diejenigen Dinge vorfinden, von denen meine amerikanischen und britischen Freunde sowie ich selbst wünschen, daß sie in den Laboratorien aller Colleges und Universitäten Amerikas und des Britischen Empires zur Verfügung stünden.“* Auf dem Grundstück dieses (nicht mehr existierenden) Gebäudes steht übrigens heute das neue ARD-Hauptstadtstudio.

Ab 1888 war Helmholtz Präsident der neu gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin Charlottenburg (Vorläufer der heutigen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig). Diese Institution kombinierte Grundlagenforschung und angewandte Forschung bis hin zu technischen Entwicklungsarbeiten, dazu metrologische Dienstleistungen sowie erstklassige Entwicklung, Pflege und Prüfung der metrologischen Normale und Standards. Helmholtz war von 1878 bis 1894 Präsident der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin. Er wurde auch als Vertreter Deutschlands zu elektrotechnischen Kongressen in Paris und Chicago gesandt, wo vor allem auch großindustrielle und internationale Interessen Deutschlands zu vertreten waren.

Arbeitsgebiete von Helmholtz

- Physiologie: Ursprung der Nervenfasern aus Ganglienzellen (Dissertation 1842), Fäulnis- und Gärungsprozesse sowie Stoffwechselvorgänge bei der Muskelkontraktion, Experimenteller Nachweis der Reizleitungsgeschwindigkeit
- Physiologische Optik: Erfindung des Augenspiegels (von größter Bedeutung in der Augenheilkunde), Anwendung der geometrischen Optik auf die optischen Phänomene im menschlichen Auge (auf mathematisch-physikalischer Grundlage), Young-Helmholtz-Theorie des Farbsehens, Theorie der räumlichen Vorstellung, Werk „Handbuch der Physiologischen Optik“ (3 Bände, 1856–1867)
- Physiologische Akustik: Klangfarbenanalyse, Theorie der Kombinationstöne, Resonanztheorie des Hörens, Helmholtz-Resonatoren, Werk „Die Lehre von den Tonempfindungen“ (1863)
- Meteorologie: Arbeiten zu meteorologischen Problemen (Gewitter, Luft- und Wasserwellen, Gletscher, Wirbelstürme), Begründer der wissenschaftlichen Meteorologie
- Physik: Arbeiten zum Energieprinzip, zu den Hauptsätzen der Thermodynamik, das Prinzip der kleinsten Wirkung, zur Strömungsmechanik und Akustik, zur Ähnlichkeitsmechanik, Lehrbuch der



Theoretischen Physik (6 Bände, posthum von seinen Schülern herausgegeben)

- Elektrodynamik: Arbeiten zur Maxwell-Theorie, Anregung für Heinrich Hertz zum experimentellen Nachweis der elektromagnetischen Wellen
- Philosophie: zur Erkenntnistheorie, zum Verhältnis von Physik, Physiologie und Erkenntnistheorie, zur Ganzheit der Wissenschaft (wahrscheinlich wurde der Begriff der „Geisteswissenschaften" für die philologischen, historischen und philosophischen Wissenschaftsdisziplinen von Helmholtz geprägt), Helmholtz als Vermittler zwischen den Natur- und Geisteswissenschaften, zum Verhältnis zwischen Wissenschaft und Kultur, philosophische und ästhetische Implikationen der Wissenschaft

Arbeiten zur Akustik und zur Strömungsmechanik

Bereits während seiner Königsberger Zeit muss Helmholtz ab etwa 1850 über akustisch-physiologische Probleme nachgedacht haben. Seine Habilitationsschrift „Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben" leitet er mit den Worten ein: *„Die Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge und Farbe unterscheiden sich in ihrer physiologischen Wirkung dadurch wesentlich von den Tönen verschiedener Schwingungsdauer und musikalischer Höhe, dass je zwei der ersteren, gleichzeitig auf die Nervenfasern einwirkend, eine einfache Empfindung hervorbringen, aus welcher auch das geübteste Sinnesorgan nicht mehr die einzelnen zusammensetzenden Elemente erkennen kann, während zwei Töne durch ihr Zusammenwirken zwar die eigentümlichen Empfindungen der Harmonie und Disharmonie erzeugen, aber dabei doch stets vom Ohre einzeln empfunden und erkannt werden."*

Zusammenhängende akustisch-physiologische Forschungen beginnen um 1855, während seiner Tätigkeit an der Universität in Bonn. Die Ergebnisse sind in dem 1863 in Braunschweig erstmals erschienenen Buch „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik" [3] dargestellt worden (siehe Abb. 5). Die zweite Auflage erschien bereits 1864; die dritte, umgearbeitete Auflage erschien 1870. Das Buch erreichte 1913 die sechste Auflage; bereits 1877 war es erstmals ins Englische übersetzt worden.

Helmholtz schreibt zur Erarbeitung der Erstauflage an den niederländischen Physiologen Frans Cornelis Donders 1860: *„Ich habe mich daran gemacht, meine akustischen Arbeiten zusammenzuschreiben; es soll daraus ein kleines Buch von möglichst populärer Haltung werden, um es auch den Musikliebhabern zugänglich zu erhalten, weil ich meine, auch die physikalisch-physiologische Begründung der Harmonielehre darin niederlegen zu können."*

DIE LEHRE

VON DEN

TONEMPFINDUNGEN

ALS

PHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGE

FÜR DIE

THEORIE DER MUSIK.

VON

H. HELMHOLTZ.

MIT IN DEN TEXT EINGEDRUCKTEN HOLZSTICHEN.

BRAUNSCHWEIG,

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.

1 8 6 3.

Abb. 5: Titel des Buches „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik" (1. Auflage, 1863), Quelle: Bibliothek Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte Berlin (mit freundlicher Genehmigung).

Aus der Vorrede zur 1. Auflage:
„Indem ich die Früchte achtjähriger Arbeit der Öffentlichkeit übergebe, habe ich zugleich noch eine Pflicht der Dankbarkeit zu erfüllen. Die vorliegenden Untersuchungen erforderten zu ihrer Vollendung die Beschaffung von neuen Instrumenten, welche nicht wohl für das Inventarium eines physiologischen Instituts paßten, und deren Kosten die gewöhnlichen Hilfsmittel eines deutschen Gelehrten überstiegen. Mir sind die Geldmittel dazu durch außergewöhnliche Bewilligungen zugeflossen ....
Ich hoffe, daß noch besser als Dankesworte der Verlauf der vorliegenden Untersuchungen zeigen möge, wie ich ernstlich bemüht gewesen bin, die mir gewährten Hilfsmittel fruchtbar zu verwerten." (Heidelberg, Oktober 1862)

Aus dem Vorwort zur 5. Auflage, 1895 von Richard Wachsmuth (deutscher Experimentalphysiker, 1868–1941):
„Freilich hat die Wissenschaft neuerdings in mehreren hier in Betracht kommenden Einzelfragen bedeutende Fortschritte gemacht. ... Die Aufnahme dieser Änderungen hätte jedoch den Umsturz großer Teile des alten Textes erfordert. Eine solche Umgestaltung seiner Arbeit hätte aber nur der Meister selbst geben dürfen. Werke, die so tief, wie das vorliegende, in die Geschichte der Wissenschaft eingeschnitten und nach den verschiedensten Seiten hin epochemachend gewirkt haben, tragen in sich das Recht, als hehre historische Denkmale in ihrer ursprünglichen Form bewahrt zu werden.

Außerdem aber vermögen alle diese Fortschritte höchstens manche Einzelheiten der Darstellung zu modifizieren, doch ändern sie in keiner Weise die großen grundlegenden Theorien über die Reizung der Nerven und die Übertragung des Schalles und den ganzen herrlichen Aufbau einer physikalischen Theorie des Klanges."

Mit diesen Forschungen und diesem Buch wurde Helmholtz zum Begründer der modernen hörphysiologischen und akustisch-musikalischen Forschung. Seine tatsächlichen Leistungen für die Akustik gehen aber weit über die audiologischen und musikalischen Fragestellungen hinaus. Einen guten Überblick über die Forschungsergebnisse von Helmholtz erhält man, wenn man die heute noch mit seinem Namen verknüpften wissenschaftlichen Erkenntnisse auflistet. In der folgenden Aufzählung werden einige dieser Begrifflichkeiten erwähnt; ausführliche Erläuterungen hierzu finden sich in [1]:

HELMHOLTZ-Gleichung der Akustik

Die allgemeine Schalldruck-Wellengleichung kann unter der Annahme eines zeitlichen Schalldruckverlaufs aus sinus-/cosinusförmigen Anteilen wie folgt dargestellt werden:

$$\Delta p + k^2 p = 0$$

Abb. 6: Abbildung eines kugel- und eines zylinderförmigen Resonators in „Die Lehre von den Tonempfindungen ...", Quelle: Bibliothek Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte Berlin (mit freundlicher Genehmigung).

74 Erste Abtheilung. Dritter Abschnitt.

System, welches eigenthümlicher Schwingungen fähig ist, und namentlich wird der Grundton der Kugel, welcher viel tiefer ist, als alle ihre anderen Eigentöne, durch Mittöne in grosser Stärke hervorgerufen. Das Ohr in unmittelbarer Verbindung mit der inneren Luft der Kugel nimmt diesen verstärkten Ton dann auch unmittelbar wahr. Hat man sich das eine Ohr verstopft (am besten durch einen Siegellackpfropf, den man nach der

Fig. 16 a.

Fig. 16 b.

Gestalt des Gehörganges geformt hat) und setzt an das andere einen solchen Resonator, so hört man die meisten Töne, welche in der Umgebung hervorgebracht werden, viel gedämpfter als sonst; wird dagegen der Eigenton des Resonators angegeben, so schmettert dieser mit gewaltiger Stärke in das Ohr hinein. Es wird dadurch Jedermann, auch selbst mit musikalisch ganz ungeübtem oder harthörigem Ohr, in den Stand gesetzt, den betreffenden Ton, selbst wenn er ziemlich schwach ist, aus einer grossen Zahl von anderen Tönen herauszuhören, ja man bemerkt den Ton des Resonators sogar zuweilen im Sausen des Windes, im Rasseln der Wagenräder, im Rauschen des Wassers auftauchend. Es sind für diese Zwecke die genannten Resonatoren ein ausserordentlich viel empfindlicheres Mittel, als es die abgestimmten Membranen sind. Wenn der wahrzunehmende Ton verhältnissmässig zu den begleitenden Tönen sehr schwach ist, ist es vortheilhaft, den Resonator abwechselnd an das Ohr anzusetzen, und wieder zu entfernen. Man bemerkt dann leicht, ob der Ton des Resonators beim Ansetzen zum Vorschein kommt oder nicht, während man einen gleichmässig anhaltenden Ton nicht so leicht wahrnimmt.

(mit Δ = Laplace-Operator, p = komplexe Schalldruckamplitude, $k = 2\pi f/c$ = Wellenzahl)

Diese (vereinfacht dargestellte) Helmholtz-Gleichung sowie die davon abgeleitete Helmholtz-Integralgleichung stellen die Basis für akustische Feldberechnungen dar, auf der praktisch alle modernen numerischen Verfahren (Finite-Elemente-Methode, Randelementmethode etc.) beruhen.

HELMHOLTZ-Resonator

Als Helmholtz-Resonator wird eine Anordnung aus einem Luftvolumen und einem zylindrischen engeren kurzen Hals mit einer Öffnung nach außen bezeichnet. So ist jede Flasche, die am Hals angeblasen wird und einen Ton erzeugt, ein Helmholtz-Resonator. Durch die Kombination der Luftmasse in der Öffnung mit der Elastizität des gesamten Luftvolumens entsteht ein mechanisches Masse-Feder-System, bei der sich ausgeprägte Eigenfrequenzen herausbilden, im Falle einer Kugelform eine einzige Eigenfrequenz.

Helmholtz verwendete diese Resonatoren, um mit seinem Ohr an der oberen spitzen Öffnung einen einzigen Grundton aus einem Klanggemisch nachzuweisen, das in die untere Öffnung eindringt (siehe Abb. 6). So hat er u. a. experimentell den Einfluss des äußeren Gehörgangs auf die Hörschwelle des Ohres bei Luftleitung des Schalls geklärt sowie die Formantbereiche der Vokale ermittelt. Außerdem hat er diese Resonatoren zur Klanganalyse verwendet.

In Abb. 7 sind 16 solche Hohlkugeln aus Messing gezeigt, deren Durchmesser im Bereich zwischen 3 und 27 cm liegt. Die Kugeln haben jeweils eine weite Öffnung und, genau gegenüberliegend, eine schmale Öffnung, die ein kurzes Rohrstück als Hals besitzt.

Helmholtz-Resonatoren sind heute u. a. im Musikinstrumentenbau zur Klang-Verstärkung und in der Raumakustik als Absorber weit verbreitet.

Abb. 7: Satz von 16 Kugelresonatoren zur Klanganalyse aus dem Helmholtzschen Labor, Durchmesser 3 bis 27 cm, Datierung vor 1863, Quelle: Historische Instrumentensammlung am Johannes-Müller-Institut für Physiologie (Charité – Universitätsmedizin Berlin).

■ HELMHOLTZ-Filter

Werden Helmholtz-Resonatoren, akustisch gekoppelt, aneinander gereiht, so entsteht ein Tiefpassfilter. Dieses wird in gasführenden Rohrleitungen und Kanälen zur Abschwächung von tieffrequenten Druckpulsationen verwendet.

■ HELMHOLTZ-Resonanzabsorber

Darunter wird eine Anordnung von Helmholtz-Resonatoren zum Zwecke der Schallabsorption, z. B. an Wänden oder in Kanälen, verstanden.

■ HELMHOLTZ-Vokaltheorie

Diese Bezeichnung wird für die Helmholtzsche Theorie der Vokalklänge verwendet, die die Bedeutung der Formantbereiche der Vokale aufklärt (Bestimmung mit Hilfe der Helmholtz-Resonatoren). Helmholtz schreibt dazu in [3]: *„Wir dürfen wohl annehmen, dass bei den Klängen des menschlichen Kehlkopfes, wie bei denen anderer Zungenwerkzeuge, die Obertöne mit steigender Höhe an Stärke kontinuierlich abnehmen würden, wenn wir sie ohne die Resonanz der Mundhöhle beobachten könnten. ... Je mehr die Mundhöhle verengert ist durch die Lippen, die Zähne oder die Zunge, desto entschiedener kommt ihre Resonanz für Töne von ganz bestimmter Höhe zum Vorschein, und desto mehr verstärkt sie dann auch in dem Klang der Stimmbänder diejenigen Obertöne, welche sich in den bevorzugten Graden der Tonhöhe nähern, desto mehr werden dagegen die übrigen gedämpft. Bei der Untersuchung des Klanges der menschlichen Stimme mittels Resonatoren findet man deshalb wohl ziemlich regelmäßig die ersten sechs bis acht Obertöne zwar deutlich wahrnehmbar, aber je nach den verschiedenen Stellungen der Mundhöhle in sehr verschiedener Stärke, bald mächtig in das Ohr hineinschmetternd, bald kaum vernehmbar."*

■ Resonanztheorie des Hörens nach OHM und HELMHOLTZ

Diese Theorie beschreibt die Fähigkeit des menschlichen Gehörs zur Klanganalyse. Sie beinhaltet, dass die Basilarmembran mit den Haarzellen im Innenohr als ein schwingungsfähiges Gebilde modelliert wird. Die einzelnen Bereiche der Basilarmembran sind – wie mechanische Resonatoren – auf unterschiedliche Resonanzfrequenzen abgestimmt. Bei der Anregung des Innenohres über den Steigbügel am ovalen Fenster der Schnecke mit einer bestimmten Frequenz schwingt derjenige Abschnitt der Basilarmembran mit den darauf befindlichen Haarzellen besonders stark, dessen Eigenfrequenz mit der entsprechenden Anregungsfrequenz übereinstimmt. Damit wird über die Bewegungen der Haarzellen dieses Basilarmembranabschnittes ein besonders starker Reiz erzeugt und über den Gehörnerv, ins Gehirn weitergeleitet, eine entsprechende Hörempfindung ausgelöst.

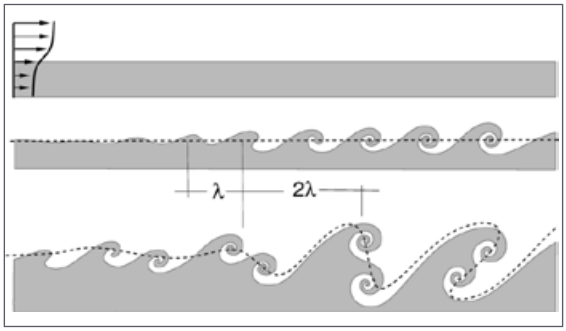


Abb. 8: Kelvin-Helmholtz-Instabilität, Wirbelentstehung und Wirbelverschmelzung, Quelle: Prof. J. Delfs, Braunschweig (mit freundlicher Genehmigung).

Die Grundlagen zu dieser Erkenntnis erkannte der Physiker Georg Simon Ohm im Jahr 1843; der experimentelle Nachweis dazu gelang 15 Jahre später Hermann von Helmholtz. Deshalb wird dieses Gesetz auch oft als das „Ohm-Helmholtzsche Gesetz der physiologischen Akustik" benannt.

■ HELMHOLTZsches Reziprozitätsgesetz

Helmholtz schreibt in [4]: *„Wenn in einem mit Luft gefüllten Raume, der theils von endlich ausgedehnten festen Körpern begrenzt, theils unbegrenzt ist, im Punkte a Schallwellen erregt werden, so ist das Geschwindigkeitspotential derselben in einem zweiten Punkt b ebenso gross, als es in a sein würde, wenn nicht in a, sondern in b Wellen von derselben Intensität erregt würden. Auch ist der Unterschied der Phasen des erregenden und erregten Punktes in beiden Fällen gleich."*

■ KELVIN-HELMHOLTZ-Instabilität

Bei der Kelvin-Helmholtz-Instabilität handelt es sich um die Instabilität zweier Strömungen unterschiedlicher Geschwindigkeit und Dichte, die durch eine Grenzfläche getrennt sind. Abbildung 8 zeigt das Schema der Wirbelentstehung an der Grenzfläche und die dann folgende Wirbelverschmelzung. Schließlich zeigt Abbildung 9 (siehe folgende Seite) ein beeindruckendes Beispiel für Kelvin-Helmholtz-Instabilitätswellen aus der Natur.

■ HELMHOLTZsche Wirbelsätze

Hierzu hat Helmholtz seine Ergebnisse in [5] veröffentlicht. In moderner Darstellung lauten für reibungsfreie Strömungen die folgenden drei Sätze:

- Erster Wirbelsatz: Im Inneren eines Fluids können keine Wirbel beginnen oder enden.
- Zweiter Wirbelsatz: Wirbel enthalten zu jeder Zeit die gleichen Teilchen.
- Dritter Wirbelsatz: Die Zirkulation ist für jeden Wirbelquerschnitt senkrecht zum Wirbelfaden konstant.

Abb. 9: Kelvin-Helmholtz-Instabilitätswellen über einem Naturpark in Longmont, Colorado, USA, Quelle: © Gregory Thompson (inclouds.com).

■ HELMHOLTZscher Satz der Vektoranalysis

Dieser Satz lautet: „Jedes, über einem einfach zusammenhängenden Gebiet mit glatter Randfläche definiertes Vektorfeld lässt sich stets additiv in einen wirbelfreien und einen quellenfreien Anteil zerlegen".
Dieser Satz wurde im Wesentlichen zuerst durch Stokes 1849 bewiesen. Vervollständigt wurde der Beweis von Helmholtz im Jahr 1859 [6].

■ HELMHOLTZ-Zahl

Im Jahre 1970 wurde von Lothar Cremer an der Technischen Universität Berlin eine Ähnlichkeitskennzahl He eingeführt, die nach Helmholtz benannt wurde. Sie ist als dimensionslose Größe für das Verhältnis zweier Längen definiert worden, und zwar für das Verhältnis einer charakteristischen geometrischen Abmessung des Schallvorganges (L) zur Wellenlänge des Luftschalls (λ):

$$He = L / \lambda$$

Die Helmholtz-Zahl wird in erster Linie zur Charakterisierung der Abstrahlung verwendet: Je größer die Helmholtz-Zahl, desto besser wird Schall abgestrahlt. Darüber hinaus kann sie auch auf andere physikalische Größen ausgeweitet werden [1], und sie spielt bei der im folgenden beschriebenen Ähnlichkeitsmechanik eine große Rolle als Maßzahl.

Abb. 10: Raumakustisches Modell der historischen Semper-Oper, Quelle: R. Dietzel, TU Dresden (mit freundlicher Genehmigung)

■ HELMHOLTZsche Ähnlichkeitsmechanik

Bei der sogenannten Ähnlichkeitstheorie wird versucht, einen physikalischen Vorgang auf einen Modellvorgang zurückzuführen, mit dem meist unter einfacheren Bedingungen als im Original experimentiert werden kann, d. h. in einem kleineren Maßstab, und bei dem bestimmte Kennzahlen die Zulässigkeit dieser Übertragung anzeigen.
Helmholtz hat bereits im Jahr 1873 hierfür die Grundlagen in [7] gelegt – eine Publikation, die Jahrzehnte fast vergessen war und erst 1966 von Werner Albring wieder an das Licht der wissenschaftlichen Öffentlichkeit geholt wurde. Albring schreibt dazu in [8]: *„benutzte er (Helmholtz) die grundlegenden Differentialgleichungen in sehr bemerkenswerter Weise. Das Integral dieser Differentialgleichungen war unbekannt, Helmholtz überlegte aber, dass die Strömung um den fliegenden Vogelkörper oder das schwimmende Schiff durch Integrale dieser Gleichungen beschrieben werden müssen. Er suchte dann – in unserer heutigen Ausdrucksweise gesprochen – nach Ähnlichkeitskennzahlen, um quantitative Aussagen für geometrisch ähnliche Körper anderer Abmessungen zu bekommen."*
Auch wird in [8] gezeigt, dass Helmholtz dem heutigen Machschen Ähnlichkeitsgesetz vorgegriffen hat, und dass in [7] bereits die Froude-Zahl und die Newton-Zahl formuliert worden sind.
Bekannte Anwendungen der Helmholtzschen Ähnlichkeitsmechanik in der Akustik sind u. a. verkleinerte Modelle von Konzertsälen, sowie von Kfz- oder Flugzeugteilen im Windkanal. Als praktisches Beispiel zeigt Abbildung 10 ein raumakustisches Modell im Maßstab 1:20, das an der Technischen Universität Dresden in den 1970er/1980er Jahren zur experimentellen Optimierung der Raumakustik der damals wieder aufzubauenden Dresdner Semper-Oper verwendet worden ist, mit einem auf das Zwanzigfache erhöhten Frequenzbereich.
Genauere Erläuterungen zu diesem Modell und weitere praktische Beispiele werden in [1] gezeigt.

Ehrungen

Helmholtz war Mitglied zahlreicher Akademien der Wissenschaften, u. a. in Berlin, München, Göttingen, Wien, St. Petersburg (Kaiserliche Russische Akademie), Paris, Stockholm (Schwedische Musikalische Akademie, Ehrenmitglied 1870), Budapest, Washington (National Academy of Science, Ehrenmitglied 1883) und Dorpat/Tartu (Ehrenmitglied 1891).

Unter seinen weiteren Ehrungen finden sich der Maximilianorden für Wissenschaft und Kunst Bayern (1866), die Ehrenbürgerschaft der Stadt Heidelberg (1869), die Copley Medaille der Royal Society London (1874) und die Ehrenbürgerschaft der Stadt Potsdam (1891).

Mehrere Ehrungen sind nach ihm benannt: So wird die Helmholtz-Medaille der Berliner Akademien der Wissenschaften seit 1891 verliehen, u. a. an: Emil du Bois-Reymond, Robert W. Bunsen, Lord Kelvin, Karl Weierstraß, Rudolf Virchow, Henri Becquerel, Emil Fischer, Max Planck, Wilhelm Conrad Röntgen, Otto Hahn, Gustav Hertz, Niels Bohr, Paul Dirac, A. N. Kolmogorov, Heinz Bethge, Manfred Eigen, Roger Penrose, Jürgen Habermas, Friedrich Hirzebruch, Günter Spur u. a.

Und schließlich wird die Helmholtz-Medaille der Deutschen Gesellschaft für Akustik seit 1991 als höchste Auszeichnung für ein Lebenswerk im Bereich der Akustik verliehen.

Abschließende Bemerkungen

Ein Verzeichnis über die wichtigsten Publikationen von Helmholtz ist in [1] zu finden. Es sei ergänzt, dass Helmholtz auch weitere bedeutende Publikationen rezensiert bzw. übersetzt hat. So sind seine Rezensionen der beiden Bände von Lord Rayleigh's „Theory of Sound" in [9] und [10] erschienen.

Es sei auch auf einen anderen Band der DEGA-Schriftenreihe zur Geschichte der Akustik hingewiesen [11], in dem die sogenannte „Ohm-Seebeck-Kontroverse" (hinsichtlich der Wahrnehmung von Obertönen durch das menschliche Ohr) ausführlich beschrieben wird. Hierzu hat Helmholtz einige Jahre später entscheidend zur Klärung beigetragen.

Zum Abschluss werden zwei Zitate erwähnt, die die besondere Bedeutung seines Lebenswerkes unterstreichen.

Zunächst ein Auszug aus der Vorlesung des Biophysikers Georg von Békésy, die er anlässlich seiner Ehrung mit dem Nobelpreis für Medizin/Physiologie 1961 gehalten hat: *"For me, the most stimulating book on hearing was Helmholtz's "Die Lehre von den Tonempfindungen". It was published in 1863. Although some of its details are not confirmed by measurements with today's instruments, the basic concepts still retain their value, and Helmholtz´s method of viewing physiology and psychology in physical terms is today just as fresh as the day it was written. Helmholtz's magnificent start, however, was followed by stagnation in auditory research, and for almost 100 years the universities taught about the same thing. The whole field of acoustics made very little progress compared with the tremendous achievements in other areas of physics."*

Abschließend eine besondere Wertschätzung, die Helmholtz im Jahr 1871 von der Firma Steinway & Sons (New York) in einem Brief vom 11.03.1871 erfahren hat:

Herrn Professor Helmholtz, Heidelberg
Geehrter Herr!
Wir sind im Besitz Ihres freundlichen Schreibens. Empfangen Sie vor allen Dingen die Versicherung, dass wir uns durch Ihren Auftrag sehr geehrt fühlen und wir werden mit Vergnügen und auf unsere Kosten einen großen Konzertflügel zur Ihrer Disposition schicken ... senden wir das Instrument an das Speditions-Geschäft der Herren Johannes Schroeder in Hamburg und wir ersuchen Sie diesen Herrn ihre Berliner Adresse mitzuteilen. Herr Hof Pianoforte Fabrikant Bechstein wird Ihnen das Instrument auf Ihr Ersuchen gewiß gerne auspacken und aufstellen.
Sollte das Instrument Ihren Beifall haben und Ihnen dessen Besitz wünschenswert sein, so spielt der Kostenpreis absolut keine Rolle und kommt durchaus nicht in Anbetracht – einmal weil Sie so viel Nutzbringendes für uns über die Erscheinung des Tones gearbeitet haben und wichtiger noch weil wir hoffen, dass dieses Piano Sie für fernere wertvolle Entdeckungen im Reiche der Töne anregen möge. ...
Unter den besten Grüßen unseres Herrn Theodor Steinway, der sich noch immer mit großen Vergnügen der anregenden Unterhaltungen erinnert, welche derselbe im vorigen Jahre mit Ihnen hatte, empfehlen wir uns
Achtungsvoll und Ergebenst
Steinway & Sons.

Literatur

[1] Költzsch, P.: Von der Antike bis in das 20. Jahrhundert – ein Streifzug durch die Geschichte der Akustik. Schriftenreihe zur Geschichte der Akustik, Heft 1, DEGA e.V., 2010 (erhältlich über die DEGA-Geschäftsstelle).

[2] Helmholtz, H. v.: Vorträge und Reden. Erster Band, 5. Auflage, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig 1903.

[3] Helmholtz, H. v.: Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. 1. Auflage, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig 1863.

[4] Helmholtz, H. v.: Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. Journal für die reine und angewandte Mathematik 57, S. 1–72, 1860.

[5] Helmholtz, H. v.: Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen. Journal für die reine und angewandte Mathematik 55, S. 25–55, 1858.

[6] Großmann, S.: Mathematischer Einführungskurs für die Physik. B. G. Teubner, Stuttgart/Leipzig, 2000.

[7] Helmholtz, H. v.: Über ein Theorem, geometrisch ähnliche Bewegungen flüssiger Körper betreffend. Monatsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, S. 501–514, 1873.

[8] Albring, W.: Helmholtz schuf eine Ähnlichkeitstheorie für Strömungen. Maschinenbautechnik 15, S. 113–118, 1966.

[9] Helmholtz, H. v.: Book Review „The Theory of Sound" (part 1). Nature 17, S. 237–239, 1878.

[10] Helmholtz, H. v.: Book Review „The Theory of Sound" (part 2). Nature 19, S. 117–118, 1878.

[11] Költzsch, P.: Sondhauß-Röhre, Seebeck-Sirene – Wer waren ihre Namensgeber?. Schriftenreihe zur Geschichte der Akustik, Heft 4, DEGA e.V., 2012 (erhältlich über die DEGA-Geschäftsstelle). ■

Prof. Dr. Peter Költzsch
ehemaliger Lehrstuhlinhaber für Technische Akustik an der Technischen Universität Dresden

Dr.-Ing. Martin Klemenz
Geschäftsführer der DEGA, Berlin