

Sehen statt hören? Was uns Schallbilder sagen können

Ewa Rehwald

*WWU Institut für die Didaktik der Physik, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149
ewa.rehwald@uni-muenster.de

Kurzfassung

Bilder spielen in der Wissenskommunikation der Naturwissenschaften eine wichtige Rolle, finden in der Didaktik bisher jedoch wenig Beachtung. Das überrascht, denn schließlich werden wir tagtäglich mit hochkomplexen Bildern aus der Forschung konfrontiert, die – auch wenn sie den Anschein erwecken – aus dem Alltagskontext heraus nicht verstanden werden können. So kommt ihnen oft nur eine illustrative bzw. eine Blickfang-Funktion zu. Am Beispiel von Schallbildern wird auf einige Schwierigkeiten der Entstehung, Funktion und Deutung der Bilder eingegangen und ihr konstruierter Charakter herausgearbeitet.

1. Einführung

Die Gegenstände der modernen Physik haben mit der Welt, wie wir sie mit unseren Sinnen wahrnehmen, wenig zu tun. Die menschlichen Sinne sind als Detektoren zugunsten von weitgehend subjektunabhängigen Messinstrumenten ersetzt worden. Ein Blick auf das elektromagnetische Spektrum macht uns die Begrenzung der menschlichen Wahrnehmung gegenüber technischer Registrierung bewusst: Auf einer Skala von über 24 Größenordnungen umfasst das sichtbare Spektrum nicht mal eine halbe Größenordnung (700-400 nm). Auch die Wahrnehmung räumlicher und zeitlicher Ausdehnung ist auf wenige Größenordnungen beschränkt.

Mit technischen Messgeräten ist der Wissenschaftler imstande, seine Wahrnehmungsfähigkeit enorm zu erweitern, was jedoch zu epistemischen Problemen führen kann. Indem er die seinen Sinnen zugänglichen Räume verlässt, verlässt der Mensch auch die ihm bekannten Bilder und Begriffe. Die daraus resultierende Frage, nämlich wie etwas aussieht, das eigentlich unsichtbar ist und wie es dargestellt werden kann, dass es auch verstanden wird, stellen sich nur die wenigsten Naturwissenschaftler [1]. In den letzten Jahren ist im Rahmen des „pictorial“ bzw. „iconic turn“ das Thema von einigen Wissenschaftshistorikern und –theoretikern [2] sowie Kunsthistorikern [3] behandelt worden, von Didaktikerseite gab es jedoch nur wenige Vorstöße [4].

Dabei ist es überaus wichtig zu reflektieren, welche Voraussetzungen der Laie braucht, um Bilder (des Unsichtbaren) zu verstehen, wenn man bedenkt, welchen Stellenwert sie innerhalb der Naturwissenschaften einnehmen. In einer Studie von 2008 konnten McCabe und Castel [5] zeigen, welche Macht Bilder in Hinblick auf Glaubwürdigkeit haben können. Probanden waren eher gewillt, einem (fiktiven) wissenschaftlichen Artikel mit dem Titel ‚Watching TV is Related to Math Ability‘ zu glauben, wenn er die Forschungsergebnisse anhand von „brain

images“ belegte, als wenn diese in Form von Balkendiagrammen präsentiert wurden. Will die Schule ihrem Auftrag gerecht werden, mündige und kritische Bürger zu erziehen, kommt sie nicht umhin, sich mit der Deutung und Bedeutung wissenschaftlicher Bilder zu befassen.

2. Physik als „Schwissenschaft“

Es scheint schon fast paradox, dass die Naturwissenschaften einerseits versuchen, die Sinne des Menschen aus den Messprozessen möglichst vollständig herauszuhalten, andererseits, auf die Sinne angewiesen sind, wenn es darum geht, die Ergebnisse zu kommunizieren. Besonders der Sehsinn hat sich im Laufe der Zeit als unentbehrlich erwiesen, ja die Physik ist nahezu auf den Sehsinn hin entworfen worden, denn im Grunde kann jede Messung als Sichtbarmachung aufgefasst werden: Eine nicht-wahrnehmbare Eigenschaft wird mittels geeigneter Theorien und oft linearer Zusammenhänge in eine quantifizierbare, sichtbare Eigenschaft übersetzt, so zum Beispiel die Temperatur als Grad der Bewegung von Teilchen (mikroskopisch) in eine Volumenausdehnung (makroskopisch). Die Eigenschaft des vermessenen Systems muss des Weiteren auf das Messinstrument übertragen werden (ein Thermometer zeigt immer nur seine eigene Temperatur an). Eine kalibrierte Skala übersetzt letztendlich die Volumenausdehnung in quantifizierbare Werte, die nun durch das Auge abgelesen werden können.

Auch die Darstellung der Ergebnisse bedient sich ganz bewusst der Leistungsfähigkeit unseres Auges. Messwerte werden ca. seit dem Ende des 18. Jh. nicht mehr (nur) in tabellarischer Form präsentiert, sondern auch graphisch [6]. Dabei wird die Genauigkeit der Zahlen zugunsten eines abstrakteren Ziels aufgegeben, nämlich der Darstellung der Beziehung zweier Größen zueinander. Die menschliche Fähigkeit der Mustererkennung ermöglicht dem geübten Betrachter, Zusammenhänge zu erkennen und Regelmäßigkeiten herauszuarbeiten.

Unsere Wahrnehmung bestimmt jedoch nicht nur darüber, wie gemessen und dargestellt wird, sondern auch Was überhaupt zum Forschungsgegenstand wird. Bis in die Neuzeit beschränkte sich die Wissenschaft rein auf die sichtbaren Dinge, weil es undenkbar war, dass es eine unsichtbare Welt geben sollte, die dem Menschen nicht zugänglich war [7]. Sichtbar war gleichzusetzen mit existent. Erst Galilei gelang es durch die Weiterentwicklung und Etablierung des Fernrohres, der Seh- und Erkenntnisfähigkeit eine neue, steigerungsfähige Dimension zu geben. Mit Hilfe von „Sehprothesen“ [8] konnte die Unsichtbarkeit überwunden werden und eröffnete dem Menschen Einblicke in eine völlig unbekannte Welt, die sich die Wissenschaften zum Gegenstand machten. Böhme spricht in diesem Zusammenhang von einer Raumrevolution: die Welt des Unsichtbaren wurde sogar als noch umfassender als die bereits bekannte Welt eingeschätzt [9]. Von nun an galt als existent, was sichtbar gemacht werden konnte (und vice versa) [10].

Eine ähnliche Revolution vollzieht sich in der heutigen Wissenschaft. Die Annahme, dass sichtbare Materie nur 5% der anzunehmenden Baryonen darstelle, führt uns erneut über die Grenzen der Sichtbarkeit hinaus, macht aber gleichzeitig bewusst wie verflochten Erkenntnis und Anschauung sind: Solange es keine theoretischen Hinweise auf die Dunkle Energie und Materie gab, war sie für uns nicht existent. Einst entdeckt, ist die Forderung nach Visualisierungen groß, was jedoch zufolge hat, dass der dunklen Materie im Bild ein Aussehen (also eine elektromagnetische Wechselwirkung) zugebilligt werden muss, das sie per Definition nicht hat.

3. Schall als Beispiel für die Sehweise der Physik

Welche Bedeutung Bilder in der Physik haben, lässt sich besonders gut am Beispiel des Schalls verdeutlichen. Obwohl unsere Ohren ein hochsensibles Messinstrument darstellen, ziehen Physiker vor, es zu umgehen und stattdessen dem Auge Vorzug zu geben. „Die „physikalische Akustik“ enthält [...]

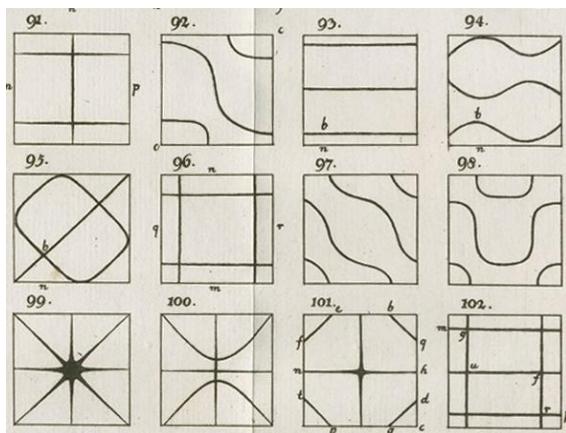


Abb. 1: Ausschnitt aus Chladnis Darstellungen der Klangfiguren einer Quadratscheibe [13]. Welche Muster sich ergeben, hängt von mehreren Faktoren ab.



Abb. 2: Chladni bei einer öffentlichen Vorführung. Die Klangfiguren wurden erzeugt, indem der Rand einer mit Sand bestreuten Kupferplatte mit einem Vionlinbogen bestrichen und dadurch zum Schwingen anregt wurde [17].

das, was vom Schall, von Musik bleibt für einen, der taub ist“ [11]. Bilder von Schwingungsmoden, Schalldruckkurven und Ausbreitungsverhalten treten anstelle von Harmonien, Rhythmen oder empfundenen Emotionen.

Die physikalische Sicht der Natur ist auf das Messbare beschränkt und dadurch gezwungen, viel wegzulassen. Für Physiker ist das innerhalb ihres Denkkollektivs unerheblich. Für den Laien jedoch, der versucht sein könnte, wissenschaftliche Bilder vor dem Hintergrund der Alltagserfahrung zu betrachten, ist ein Bewusstsein dieser reduzierenden Perspektive äußerst wichtig. Denn viele Ansichten, beispielsweise von Atomen oder Galaxien, liegen nur als wissenschaftliche Bilder vor, was uns in Versuchung führen könnte, diese Repräsentationen bedenkenlos in unsere Wahrnehmung einzugliedern. Bilder würden dann mit Realität gleichgesetzt. Die Tatsache, dass Physik die Natur im Lichte spezieller Methoden und Fragen abbildet, bliebe unberücksichtigt.

Das Beispiel des Schalls eignet sich deshalb hervorragend, um die physikalische Sehweise als solche vor Augen zu führen und einzuüben, weil wir durch das Hören eine vom Sehen unabhängige Referenz zum eigentlichen Phänomen haben. Schon Einstein hat sich dieses didaktische Potential zunutze gemacht. Auf die Frage, ob sich alles auf naturwissenschaftliche Weise wird abbilden lassen können, antwortet er: „Ja, das ist denkbar, aber es hätte doch keinen Sinn. Es wäre eine Abbildung mit inadäquaten Mitteln, so als ob man eine Beethoven Symphonie als Luftdruckkurve darstellte.“[12] Durch den direkten Vergleich zwischen Gehörtem und sichtbar Gemachtem kann ein Einblick gegeben werden, was

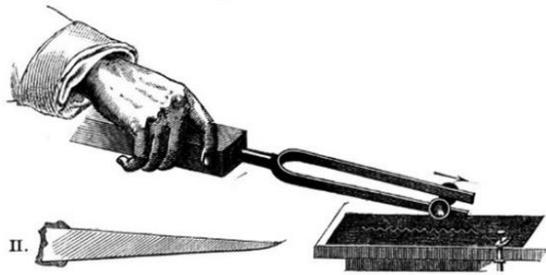


Abb. 3: Vibriographie und Schreibfederchen nach Weber [14].

unter der physikalischen Brille vom ursprünglichen Phänomen übrig bleibt.

4. Entstehung und Deutung von Schallbildern

Die ersten „Schallbilder“ stammen von Ernst Florens Chladni am Ende des 18. Jh. Dieser war darum bemüht gewesen, das Schwingungsverhalten von zweidimensionalen Körpern zu untersuchen. Nach dem Vorbild Lichtenbergs, der mittels Harzstaubs elektrische Figuren erzeugen konnte, streute Chladni Sand auf verschieden geformte Kupferplatten und regte sie mittels eines Violinbogens zum Schwingen an. Je nach Größe, Form und Material der Platten sowie dem Ort des Einspannens und des Anstrichs entstanden unterschiedliche Sandmuster (vgl. Abb. 1 und 2), die Chladni als Knotenlinien interpretierte [13]. Diese Klangfiguren bildeten den Anfang der experimentellen Akustik und der Tradition, sich mit Hilfe von Bildern, einem Forschungsgegenstand zu nähern. Weitere Beispiele sind Youngs optisch-akustischer Versuche mit dem Kaleidophon, die Pate für die Lissajous Figuren standen, Vibriographien und Scotts Phonautographen, dem Kundschen Rohr und Toeplers „Schallfotografien“ (Vgl. Abb.1).

All diese Verfahren hatten zum Ziel, Erkenntnisse über Schall zu gewinnen, indem sie Schall Bilder erzeugen ließen. Dabei sollte sich die Natur möglichst direkt einschreiben ohne einen Umweg über die Idealisierung und Ästhetisierung des Menschen zu machen [15]. Dabei wurde übersehen, dass die vorgegebenen Methoden des Einschreibens bereits vom Menschen her gedacht sind! Über die Vibriographien, die die auf Papier übertragene Schwingung einer Stimmgabel darstellen, schreibt Pisko 1865: „Die ersten Schreibfederchen waren hart und ähnlich den Schreibstiften. Sie waren mit Tinte getränkt und als Schreibfläche diente Papier. Da sich hierbei ein zu großer Widerstand herausstellte, so nahm man zu einem kleinen mit Tinte getränkten Pinsel seine Zuflucht...“ [16] Schließlich erwies sich ein biegsamer Blechstreifen, der sich in beruhtes Glas einradierte als optimales Schreibwerkzeug. Die ersten Ort-Zeit-Diagramme einer Stimmgabel konnten auf diese Weise aufgezeichnet werden (Vgl. Abb. 3).

Mit den Bemühungen um die Vereinheitlichung der Tonlage in Europa wurde des Weiteren ein optisch-akustisches Verfahren entwickelt, welches das Schwingungsverhältnis zweier Stimmgabeln sichtbar

machen konnte. Es baute auf den Vibriographien auf, erweiterte diese jedoch um eine weitere Stimmgabel, die um 90° gedreht an die erste gekoppelt wird. So werden nicht mehr Amplitude und Zeit gegeneinander aufgezeichnet, sondern die Schwingungen der Stimmgabeln in x- und y-Richtung. Stimmen die Frequenzen überein, entsteht lediglich ein Strich, weichen sie voneinander ab, bilden sich je nach Verhältnis unterschiedliche Gebilde aus, die uns heute als Lissajous Figuren bekannt sind (Vgl. Abb. 4). Pisko schreibt euphorisch: „Das optisch-akustische Verfahren verwandelt die akustische Erscheinung in eine optische; es setzt das Auge an die Stelle des Ohres, es lässt, könnte man sagen, den Ton sehen (!).“ (S. 111) „Man sieht also, dass auf diesem Wege selbst ein Tauber (!) die Gabeln gegeneinander trefflich stimmen könnte.“ (S. 107) [14]

Bilder sind somit zwar in der Lage, einen weiteren Zugang zum Schall zu schaffen, das menschliche Gehör gänzlich ersetzen, können sie jedoch nicht. Chladnis Klangfiguren hätten für sich gesehen höchstens eine ästhetische Komponente, ihre wissenschaftliche Bedeutung entfalten sie jedoch erst, wenn sie vor dem Hintergrund des erzeugenden Tons aufeinander bezogen, geordnet und einem sinngebenden System dargestellt werden. Erst im ständigen Abgleich mit dem Gehörten, ähnlich einer Übersetzungsarbeit, kann der Wissenschaftler erlernen, wie die entstandenen Darstellungen zu deuten sind. Die Interpretation bezieht auch immer die experimentellen Bedingungen mit ein und den zu dieser Zeit geltenden Wissensstand.

5. Schall sehen?

Die bisher beschriebenen Methoden haben einen bildlichen Zugang zum Phänomen den Schalls gemein, der aus der Akustik her gedacht ist. August Toepler (1836-1912), dessen Grab ausgerechnet die Inschrift „Er sah als erster den Schall“ ziert, war weniger an akustischen Fragestellungen als an opti-

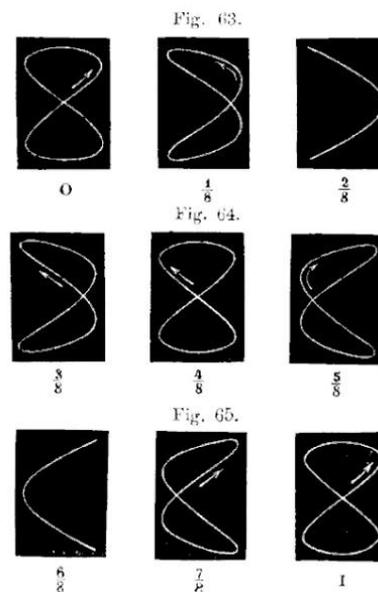


Abb. 4: Lissajous Figuren nach [14], S. 108.

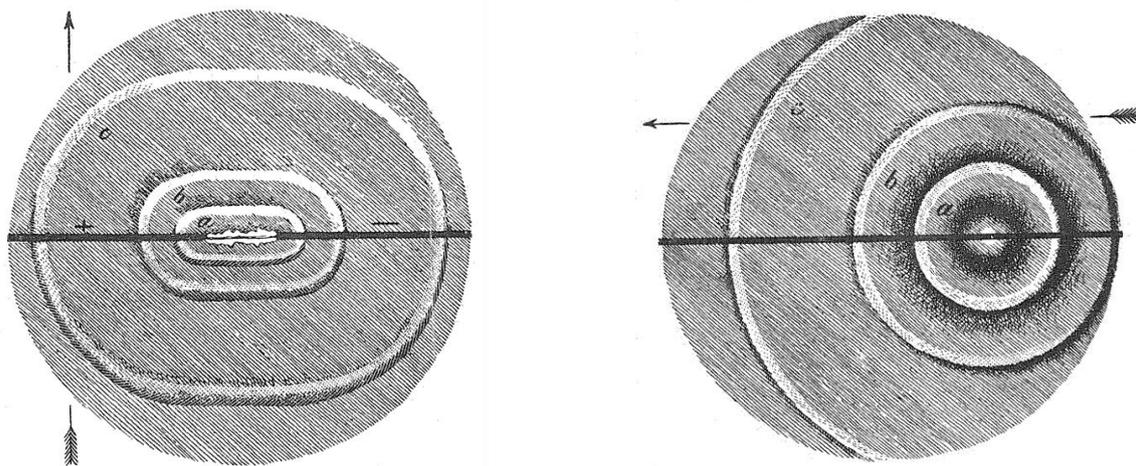


Abb. 5: Zwei Ansichten vom selben Phänomen. Links ist der Druckwelle auslösende Funke noch zwischen den Elektroden zu sehen. Rechts wurden die Elektroden räumlich versetzt, sodass der Funke entlang der optischen Achse verläuft. Perspektivisch erwecken die Elektroden den Anschein, ein durchgehendes Objekt zu sein, an dem irgendwo die Quelle der ausgehenden Druckwelle lokalisiert ist. In beiden Bildern sind die unterschiedlichen Druckwellenfronten auf dicht aufeinanderfolgende Funken zurückzuführen [18].

schen interessiert. Er hatte um 1860 eine Methode entwickelt, Dichteschwankungen in Medien (Schlieren) sichtbar zu machen, die ursprünglich dazu gedacht war, Irregularitäten in Linsen zu erkennen. Als Demonstration für die Empfindlichkeit seiner Apparatur wagte Toepler sich schließlich an Dichteschwankungen der Luft, die von Schall herrührten. Auf diese Weise kam er zu ganz anderen Bildern von Schall als die bereits bekannten.

Sein erster Versuch, den Schall von kurzen schrillen Holzpfeifen sichtbar zu machen, scheiterte an zu geringen „Dichtigkeitsunterschieden“. Auch eine Abwandlung in Form zweier einschließender Glascheiben, die der Abnahme der Schallintensität entgegenwirken sollte, führte nicht zum gewünschten Ergebnis [18]. Schließlich kam Toepler die Idee, als Schallquelle den elektrischen Funken zu nehmen, den er bisher nur zu Beleuchtungszwecken benutzt hatte. In der Tat, kam er auf diese Weise zu den gewünschten Ergebnissen, auch wenn statt der gewünschten regelmäßigen Schallwellenfronten nur eine einzige zu sehen war.

Die anfänglichen Schwierigkeiten verdeutlichen noch einmal, wie sehr experimentelle Apparaturen auf ganz bestimmte Voraussetzungen festgelegt sind. So bestimmt in vielen Fällen nicht der Untersuchungsgegenstand die Methode sondern umgekehrt: Die Messmöglichkeiten schränken das Forschungsspektrum erheblich ein.

6. Darstellungsweisen und ihre Entwicklung

Wissenschaftliche Bilder können den Betrachter glauben machen, er sehe genau das, was der Experimentator gesehen hat [21]. In der Regel durchlaufen Abbildungen jedoch eine Entwicklung: Was der Laie zu sehen bekommt, steht am Ende eines langen (fälschlicherweise als linear dargestellten) Forschungs- und Bildgebungsprozesses. Es ist ein fina-

les Produkt, das oft nur zum Zweck der Publikation geschaffen wurde.

Anhand von Toeplers Illustrationen können einige Aspekte der Entwicklung in der Darstellungsweise nachvollzogen werden, die nicht nur physikalischen Gegebenheiten gehorchen, sondern durchaus auch ästhetische Aspekte aufgreifen. Zunächst beobachtete Toepler die sich ausbildenden Druckwellen entlang eines Funkens, der zwischen zwei Elektroden überspringt (vgl. Abb. 5 links). Oft verlief dieser nicht geradlinig, sodass auch die Druckwelle dementsprechend amorph wirkte. Zusätzlich blendete der Funke bei den Beobachtungen, so dass Toepler beschloss, die Elektroden hintereinander auf die optische Achse zu verlegen. Auf diese Weise war der eigentliche Auslöser der Druckwellen aus dem Bild verschwunden, die Elektroden bildeten eine Linie und die Druckwelle ergab einen vollkommenen Kreis. Des Weiteren hatte diese Perspektive den Vorteil, dass die Ausprägung der Wellenfront stärker erschien, weil sie sich über die Länge des Funkens „aufaddierte“.

Auch wenn Toepler hierbei pragmatisch argumentiert haben mag, so geht dies doch auf Kosten der Verständlichkeit der Bilder. Ein höherer Abstraktionsgrad ist zu ihrem Verständnis erforderlich. Details zum Aufbau müssen angelesen werden. Des Weiteren kann sich der Betrachter des Eindrucks nicht erwehren, dass auch ästhetische und idealisierende Erwägungen eine Rolle gespielt haben müssen. Die perfekte Geometrie der Abbildungen erinnert an Huygens Elementarwellentheorie, wirkt darüber hinaus optisch sehr ansprechend und hat auch ein vereinfachendes Moment. Weicht nämlich die Form der Druckwelle von der Idealgestalt eines Kreises ab, weiß der Experimentator auf Anhieb, dass eine Störung vorliegt, was weiteren, komplexeren Untersuchungen zugutekommt.

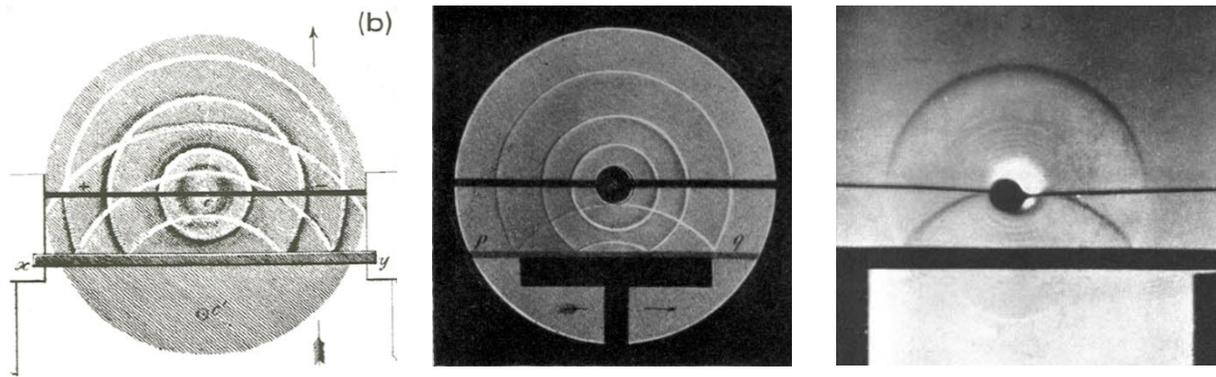


Abb. 6: Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von Druckwellen und ihrer Reflexion an einer Platte. Während die Abbildungen links [18] und in der Mitte [19] auf der Grundlage vieler Beobachtungen, Skizzen und Idealisierungen angefertigt wurden, hält die rechte Abbildung [20] nur ein einziges Ereignis fotografisch fest. Dem Zugrunde liegt eine unterschiedliche Auffassung von Objektivität [15].

Weiterhin arbeitete Toepler an der Qualität seiner Darstellungen. Während die ersten Abbildungen noch relativ skizzenhaft wirken, sind spätere Stiche nahezu von der Perfektion einer Fotografie (und wurden auch von manchem dafür gehalten) (vgl. Abb. 6).

7. Neuere Schallbilder

Während Schallbilder im 19. Jahrhundert den Grundfragen der Akustik nachgingen (Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, Schwingungsverhalten von Körpern, Bestimmung von Frequenzen), erfüllen heutige Schalldarstellungen einen ganz anderen Zweck. Akustische Kameras, die im Wesentlichen aus einem Array von Mikrofonen und einer Digitalkamera bestehen, nehmen Schalldaten in Abhängigkeit vom Ort auf und sind in der Lage, mit Hilfe der Beamformingmethode auf den Schallemitter zurückzurechnen (vgl. Abb. 7). Das setzt die Kenntnis exakter theoretischer Beschreibungen der Schallausbreitung und der Signalverarbeitung voraus. Schallbilder werden in diesem Fall nicht mehr „von Natur erzeugt“, sondern von Computern auf der Basis von Messdaten berechnet.

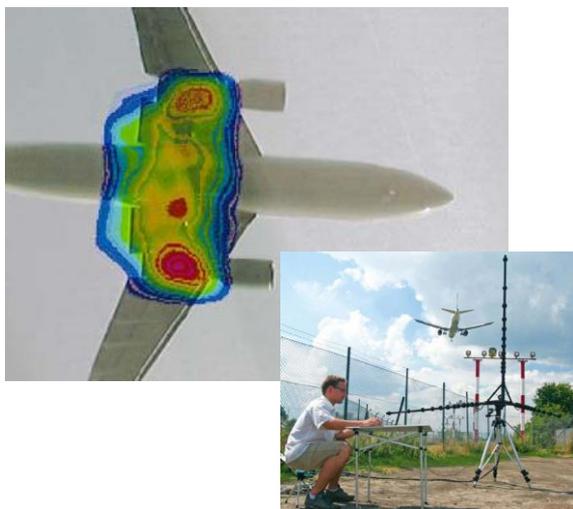


Abb. 7: Akustische Kamera und die berechnete Schallmission, deren Legende leider fehlt [22].

Die Kompetenz, wissenschaftliche Bilder richtig zu deuten, muss demnach auch eine Reflexion bezüglich ihrer Entstehungszeit und ihres Zwecks innerhalb des Forschungsprozesses beinhalten. Kurze Bildunterschriften, die dem Bild nur ein Phänomen zuschreiben, greifen zu kurz und erwecken leicht den Eindruck einer allumfassenden Abbildung.

8. Fazit

Bilder, die das Unsichtbare sichtbar machen, sind für Wissenschaftler selbst, aber auch die öffentliche Wirkung von Wissenschaften und somit für Laien von großer Bedeutung: Sie eröffnen Zugänge zu Bereichen, die sonst verborgen blieben, sie lassen den zugrundeliegenden Gegenstand bekannt und beherrschbar erscheinen und schaffen Evidenzen. So sinnvoll diese Bilder auch sein mögen, so groß ist zugleich die Gefahr, dass sie missverstanden und mit der Realität gleichgesetzt werden. Denn für ein adäquates Verständnis müssen solche Bilder vom Betrachter adäquat reflektiert und korrekt gelesen werden. Diese Bildlesekompetenz wird bisher nur von wenigen als Kompetenz erkannt, geschweige denn gefördert.

Am Beispiel von Schallbildern wurde der Versuch unternommen, auf einige zentrale Aspekte der Deutung wissenschaftlicher Bilder zu verweisen:

- Bilder des Unsichtbaren haben keine Referenz und müssen nach verständlichen Ausdrucksformen suchen.
- Die physikalische Sehweise beschränkt sich auf das Messbare und blendet einen nicht unerheblichen Teil unserer Realität aus. Wissenschaftliche Bilder dürfen nicht als repräsentativ gewertet werden.
- Wissenschaftliche Bilder erfüllen einen Zweck innerhalb eines Forschungsprozesses. Sie sind das Ergebnis einer gezielten Fragestellung und eines eng begrenzten experimentellen Aufbaus zu einer gewissen Zeit und vor dem Hintergrund bereits vorhandenen Wissens.
- Bilder bedürfen der Interpretation, die keineswegs eindeutig ausfallen muss.

- Es gibt verschiedene Darstellungsweisen für ein und dasselbe Phänomen.

Es bleibt zu hoffen, dass sich mit der Zeit ein Bewusstsein für die Wichtigkeit und die Problematik wissenschaftlicher Bilder herausbilden wird und dieses auch irgendwann in den Schulunterricht Einzug hält.

9. Literatur

- [1] Krug, Joachim: Ein Auge welches sieht, das andere welches fühlt. Bilder aus der physikalischen Nanowelt. In: Heintz, Bettina; Benz, Arnold (Hg.): Mit dem Auge denken. Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten. Zürich 2001, S. 121–139.
- [2] Exemplarisch: Heßler, Martina (Hg.): Konstruierte Sichtbarkeiten. Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit. München 2006; Hennig, Jochen: Bildtradition und Differenz. Visuelle Erkenntnisgewinnung in der Wissenschaft am Beispiel der Rastertunnelmikroskopie. In: Bredekamp, Horst (Hg.): Das technische Bild. Kompendium zu einer Stilgeschichte wissenschaftlicher Bilder. Berlin 2008, S. 86–95; Heßler, Martina/Mersch, Dieter (Hg.): Logik des Bildlichen. Zur Kritik der ikonischen Vernunft, Bielefeld 2009.
- [3] Lohoff, Markus: Wissenschaft im Bild. Performative Aspekte des Bildes in Prozessen wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung und –vermittlung, Dissertationsschrift, Aachen 2007.
- [4] Schlichting, Hans Joachim (2003): Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser. Zur Bedeutung des Sehens in der klassischen Physik. In: *Phy/Did*, Jg. 1/2, S. 9–18; Schlichting, Hans Joachim (2003): Sichtbarkeit jenseits des Lichts. Zur Bedeutung des Sehens in der modernen Physik. In: *Phy/Did*, Jg. 2/2, S. 81–89. Euler, Manfred: Visualizing the invisible nanoworld: ICT-enhanced reflection of imaging and images of atoms in nanoscience, in: A. Méndez-Vilas: Education in a technological world, Formatex 2011, S. 599–606.
- [5] McCabe, David P.; Castel, Alan D. (2008/4): Seeing is believing: The effect of brain images on judgments of scientific reasoning. In: *Cognition*, Jg. 107, H. 1, S. 343–352.
- [6] Hankins, Thomas; Silverman, Robert: Instruments and the Imagination, New Jersey 1995, S. 113ff.
- [7] Dieses Phänomen bezeichnet Blumenberg als Sichtbarkeitspostulat. Vgl. Blumenberg, Hans: Die Genesis der kopernikanischen Welt, Frankfurt a. M. 1996, S. 723–747.
- [8] Schlichting: Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser, S. 17.
- [9] Böhme, Hartmut: Bildevidenz, Augentäuschung und Zeugenschaft in der Wissenschaft des Unsichtbaren im 17. Jahrhundert, in: Bredekamp (Hg.): Dissimulazione onesta oder ehrliche Vorstellung, Hamburg 2003, S. 26.
- [10] Einer der berühmtesten Zitate von Mach betrifft das Bestreiten der Existenz von Atomen mit dem Argument „Ham’s ans gsehn?“
- [11] Wagenschein, Martin: Erinnerungen für Morgen. Eine pädagogische Biographie, Weinheim/Basel 1983, S.138–139.
- [12] Born, Max: Erinnerungen an Einstein. *Physikalische Blätter* 7 (1965), S. 300.
- [13] Chladni, Ernst F. F.: Entdeckungen über die Theorie des Klanges, 1787, S. 109.
- [14] Vgl. Pisko, Franz Josef: Die neueren Apparate der Akustik 1865.
- [15] Daston hat gezeigt, dass etwa um die Mitte des 19 Jh. eine Umorientierung in der Definition des Objektivitätsbegriffes und in der wissenschaftlichen Praxis gab. Die Natur sollte für sich selbst sprechen, der Mensch als Vermittler so weit wie möglich ausgeblendet werden. (Vgl. Daston, Lorraine u.a.: Objektivität, Frankfurt am Main 2007, S. 121–200.)
- [16] Pisko, S. 61.
- [17] Ullmann, Dieter: Chladni und die Entwicklung der Akustik von 1750 – 1860, Basel 1996.
- [18] Toepler, August: Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode, Leipzig 1906, S. 32f.
- [19] Toepler, August: Beobachtungen nach der Schlierenmethode, Leipzig 1906.
- [20] Toepler, Maximilian: Neue, einfache Versuchsanordnung zur bequemen subjektiven Sichtbarmachung von Funkenschallwellen nach der Schlierenmethode, in: *Annalen der Physik* 332/15 (1908), S. 1043–1050.
- [21] Hampe, Michael: Zur Relevanz der Bilder in der Wissenschaft, in: *zhwinfo* 29 (2006), S. 17–21.
- [22] www.acoustic-camera.com (Stand 4/2012).