

Martin Wagenscheins naturphilosophischer Ansatz

Peter Stettler, Kantonsschule Freudenberg, Zürich

In der Einleitung wird kurz Martin Wagenscheins pädagogisches Wirken geschildert, in dessen Zentrum das ursprüngliche Verstehen und exakte Denken steht. Das Verstehen der Physik gelingt nur, wenn diese nicht als voraussetzungslos, sondern sich selbst auf das Messbare beschränkend betrachtet wird. Die Selbstbeschränkung ihrer Disziplin scheinen viele Physiker wenig zu beachten, wenn sie z. B. aus einer einheitlichen Theorie des Universums dessen Sinn deuten wollen. Wagenscheins philosophisches Interesse gilt der Hervorbringung der Physik aus der Lebenswelt. Dieser Erkenntnisweg wird am Beispiel eines Saitenklangs geschildert. Bei der Frage nach dem Wesen des Lichts wird in wagenscheinischer Art darauf hingewiesen, dass das Licht «an sich» gar nicht sichtbar ist. Dadurch wird der Gleichnis-Charakter von Lichtwellen oder Photonen und deren komplementäres Verhältnis auch vom «Anfänger» mühelos erkannt. Das eigentlich Bildende im wissenschaftlichen Umgang mit der Natur sieht Wagenschein in deren Verstehbarkeit, in der Entdeckung der rätselhaften Ordnung des Kosmos.

Martin Wagenschein's Nature-Philosophical Approach

In the introduction we briefly describe the pedagogical work of Martin Wagenschein, in whose centre stands original understanding and precise thinking. The process of understanding physics can only succeed if it is not regarded without certain presumptions, but as limiting itself on the measurable. It is this self-limitation of their subject that many physicists seem to disregard, if they want to interpret a meaning of the universe from its unified theory. Wagenschein's philosophical interest centres on the creation of physics from the living world. This epistemological path is described in the example of a cord's sound. On the question about the nature of light it is pointed out in a Wagenscheinian manner that light as such is not visible. By this means even the beginner will realize the parabolic character of light-waves and photons and their complementary relationship. Wagenschein sees the true pedagogical value in the understandability of nature, in the discovery of an enigmatic order in the universe.

1 Einleitung

Martin Wagenschein (1896–1988) gehört zweifellos zu den grössten Pädagogen unserer Zeit. Schon als junger Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik fiel ihm die «fast abenteuerliche Hinfälligkeit der Kenntnisse» seiner Schüler auf, die er als Folge einer zu schnellen und daher oberflächlichen Erledigung einer zu grossen Stofffülle erkannte. Zwischen 1923 und 1933 war er Mitarbeiter an Paul Geheeb's Odenwaldschule, einer freien Schulgemeinde mit Epochenunterricht, Koedukation (im Internat!) und ohne Noten und Strafen. Dort entwickelte er seine eigenen pädagogischen Ideen. Nach der Macht ergreifung der Nazis flüchtete Geheeb in die Schweiz und gründete die Ecole d'Humanité, die ihren Platz nach einer beschwerlichen Odyssee schliesslich auf dem Hasliberg im Berner Oberland fand. Wagenschein blieb in Deutschland und half am staatlichen Gymnasium einer verunsicherten Jugend über die schwere Zeit. Nach dem Krieg arbeitete er an Bildungsreformen und Schulversuchen in Deutschland. Insbesondere gehörte er um 1951 zu den Be-

gründern des Exemplarischen Unterrichts. Um dieses Unterrichtsprinzip genauer thematisieren zu können, schuf er die Begriffs-Trias «genetisch-sokratisch-exemplarisch»: *Das Genetische* «gehört zur Grundstimmung des *Pädagogischen* überhaupt. Pädagogik hat mit dem Werdenden zu tun: mit dem werdenden Menschen und – im Unterricht, als Didaktik – mit dem Werden des Wissens in ihm. Die *sokratische* Methode gehört dazu, weil das Werden, das Erwachen geistiger Kräfte, sich am wirksamsten im Gespräch vollzieht. Das *exemplarische* Prinzip gehört dazu, weil ein genetisch-sokratisches Verfahren sich auf exemplarische Themenkreise beschränken muss und auch kann. Denn es ist – ich sage nicht <zeitraubend>, sondern – <mussefordernd> und deshalb von hohem Wirkungsgrad» (Wagenschein, 1968/1989). Seit 1950 war Wagenschein in Darmstadt, Tübingen und Frankfurt auch als Hochschullehrer tätig. In seinem legendären Darmstädter Seminar, das er bis zu seinem 90. Lebensjahr durchführte, brachte er durch seine unbequemen sokratischen Fragen und seine bis ans Skandalöse reichende Geduld sowohl Studenten wie auch Professoren zum «ursprünglichen Verstehen und exakten Denken» (W, 1965, 1970)¹. Durch diesen Anspruch wurde er fast zwangsläufig immer wieder zu naturphilosophischen und erkenntnistheoretischen Fragen geführt.

2 Grenzen und Grenzübertritte naturwissenschaftlicher Erkenntnis

Wenn ich über erkenntnistheoretische Aspekte im Lebenswerk² von Martin Wagenschein spreche, geschieht das aus dem Grund, weil ich durch ihn Physik und Mathematik in neuem Lichte sah. Ich habe zwar Physik studiert, war dann während 5 Jahren in der physikalischen Grundlagenforschung tätig und einige Jahre als Physiklehrer am Gymnasium

– «Und ziehe schon an die zehen Jahr'

Herauf, herab und quer und krumm

Meine Schüler an der Nase herum» –

(Goethe, Faust I)

als ich im Spätherbst 1975 eine pädagogische Tagung mit dem Titel «Rettet die Phänomene» besuchte. Dort habe ich zum ersten Mal vernommen, was ich eigentlich schon lange hätte wissen müssen: «Physik ist nur einer – wenn auch der mächtigste – der möglichen Natur-Aspekte; nicht voraussetzungslos, sondern zum vornherein sich selbst beschränkend auf das mit Massstab, Waage und Uhr Messbare, soweit wir so Gemessenes in mathematisierten Strukturen miteinander in Beziehung setzen, einander zuordnen können. Es entsteht so ein besonderes <Natur-Bild>, eine <Denkwelt> können wir auch sagen... Nach Vergleichen, die von Physikern selbst herrühren, bildet es die uns umgebende sinnenhafte Wirklichkeit der Phänomene so ab wie eine

¹ Wagenscheins Werke werden im folgenden mit «W» aufgeführt.

² Der Wortlaut des Vortrags, den der Verfasser am 3. Juli 1989 anlässlich der dritten Martin-Wagenschein-Tagung des Weltbundes für Erneuerung der Erziehung an der Ecole d'Humanité in Goldern-Hasliberg hielt, wurde weitgehend beibehalten.

Landkarte die Landschaft, wie die Partitur eine Symphonie, wie der Schatten seinen Gegenstand. Dabei aber bildet es so scharf und so richtig ab, wie eben der Schatten eines Blütenbaumes an der Mauer sich abzeichnet. Nur: Der Baum selber kann der Schatten nicht sein wollen. Von nur seiner Struktur, seiner Geometrie, ist etwas geblieben, aber es fehlen Farbe und Duft, Räumlichkeit und das Rauschen seiner Blätter» (W, 1980).

Die meisten Naturwissenschaftler scheinen allerdings Mühe zu haben, die grundsätzliche Selbstbeschränkung ihrer Disziplin anzunehmen. Dazu einige Zeilen aus dem Schluss des grossartigen Buches «Die ersten drei Minuten» vom Physiknobelpreisträger des Jahres 1979, Steven Weinberg. Es handelt von der Entstehung des Universums.

Er beschreibt fast poetisch eine Abendstimmung und fährt dann fort: «Man begreift kaum, dass dies alles nur ein winziger Bruchteil eines überwiegend feindlichen Universums ist. Noch weniger begreift man, dass dieses gegenwärtige Universum sich aus einem Anfangszustand entwickelt hat, der sich jeder Beschreibung entzieht und seiner Auslöschung durch unendliche Kälte oder unerträgliche Hitze entgegenght. Je begreiflicher uns das Universum wird, um so sinnloser erscheint es auch. Doch wenn die Früchte unserer Forschung uns keinen Trost spenden, finden wir zumindest eine gewisse Ermutigung in der Forschung selbst . . . Das Bestreben, das Universum zu verstehen, hebt das menschliche Leben ein wenig über eine Farce hinaus und verleiht ihm einen Hauch von tragischer Würde» (Weinberg, 1977).

Ein wahrhaft faustischer Erkenntniskater! Aber hätte Weinberg denn je Grund zur Hoffnung haben können, aus der physikalischen Betrachtung des Universums einen Sinn zu sehen? Ist die Bedeutung des menschlichen Daseins an nichts anderem zu ermesen als aus Zahlenvergleichen in Raum und Zeit?

Der berühmte englische Physiker Stephen Hawking widmet in seinem Bestseller «Eine kurze Geschichte der Zeit» einige Zeilen der philosophischen Reflexion über wissenschaftliche Theorien: «Wenn wir uns mit der Beschaffenheit des Universums befassen und Fragen erörtern wollen wie die nach seinem Anfang oder seinem Ende, müssen wir eine klare Vorstellung davon haben, was eine wissenschaftliche Theorie ist . . . Eine Theorie existiert nur in unserer Vorstellung und besitzt keine andere Wirklichkeit. Gut ist eine Theorie, wenn sie zwei Voraussetzungen erfüllt: Sie muss eine grosse Klasse von Beobachtungen auf der Grundlage eines Modells beschreiben, das nur einige wenige beliebige Elemente enthält, und sie muss bestimmte Voraussagen über die Ergebnisse künftiger Beobachtungen ermöglichen . . .» (Hawking, 1988). Und weiter: «Letztlich ist es das Ziel der Wissenschaft, eine einzige Theorie zu finden, die das ganze Universum beschreibt.» Die einheitliche Theorie des Universums, die schon Einstein und Heisenberg vorschwebte, ist die in mathematische Form geronnene Idee des Einen. In der neopositivistischen Sprache heisst sie GUT (Grand Unified Theory), wodurch die platonische Herkunft dieser Idee kaum mehr zu erkennen ist. Diese radikale Vereinheitli-

chung der Physik nimmt Hawking weit ernster als seine Reflexionen über Theorien: «Es gibt jedoch ein grundlegendes Paradoxon bei der Suche nach einer vollständigen einheitlichen Theorie. Die Vorstellung über wissenschaftliche Theorie, wie sie oben dargelegt wurde, setzt voraus, dass wir vernunftbegabte Wesen sind, die das Universum beobachten und aus dem, was sie sehen, logische Schlüsse ziehen können. Diese Vorstellung erlaubt es uns, davon auszugehen, dass wir die Gesetze, die das Universum regieren, immer umfassender verstehen. Doch wenn es tatsächlich eine vollständige einheitliche Theorie gibt, würde sie wahrscheinlich auch unser Handeln bestimmen. Deshalb würde die Theorie selbst die Suche nach ihr determinieren! Und warum sollte sie bestimmen, dass wir aus den Beobachtungsdaten die richtigen Folgerungen ableiten? . . .»

Wie können Gesetze, die ja nur in unserer Vorstellung existieren, das Universum «regieren»? Ein freudscher Versprecher oder ein Rückfall in ein magisch-animistisches Weltbild: Naturgesetze als die Götter unserer Zeit? Die Situation ist entsprechend unheimlich, aber Hawking wäre kein Experte seines Fachs, wenn er sich seiner Irritation einfach so stellen würde, und die Wissenschaft als kognitiver Dienstleistungsbetrieb lässt ihn nicht im Stich: «Die einzige Antwort, die ich zu diesem Problem weiss, beruht auf Darwins Prinzip der natürlichen Selektion.»

Wenn Darwins Selektionstheorie eine naturwissenschaftliche Theorie ist, dann müsste sie eine Teiltheorie der GUT sein, und Hawkings Logik hätte sich in den Schwanz gebissen. Was die naturwissenschaftliche Begründung des Darwinismus betrifft, hat der Zürcher Philosoph Gerhard Huber diese kritisch unter die Lupe genommen: «Mit dem Selektionsgedanken überträgt Darwin das Modell der Tier- und Pflanzenzucht auf die Natur . . . Darwins Leitmotiv ist also anthropomorphen oder technomorphen Ursprungs.» Die Idee des Kampfes ums Dasein, die das Selektionsprinzip begründen soll, hat Darwin aus der Bevölkerungstheorie von Thomas Malthus übernommen: «. . . sie reflektiert eine Gesellschaftsauffassung, nach der die Individuen primär einander feindlich gegenüberstehen – der Reflex der bürgerlichen Konkurrenzgesellschaft in der Zeit des Manchester-Liberalismus» (Huber, 1981).

Nachdem Hawking (wie übrigens viele Naturwissenschaftler) den Darwinismus zu einer Art Ersatzreligion emporstilisiert hat, ist es nur ein kleiner Schritt bis zum Schlusssatz seines Kapitels «Ursprung und Schicksal des Universums»: «Wenn das Universum wirklich in sich selbst abgeschlossen ist, wenn es wirklich keine Grenze und keinen Rand hat, dann hätte es auch weder einen Anfang noch ein Ende. Es würde einfach *sein*. Wo wäre dann noch Raum für einen Schöpfer?»

Weinberg und Hawking sind Frontkämpfer der Physik; sie sind an der oberen Grenze tätig, an der Grenze des Fortschritts, wo Wissen aus Nichtwissen zu entstehen scheint. Wer sich in solchen Höhenlagen aufhält, scheint oft wenig Zeit und Anlass zu haben, sich um andere Grenzen der Erkenntnis zu kümmern. Es gibt jedoch eine weitverbreitete naturwissenschaftliche Haltung,

welche alle Grenzen der Erkenntnis (ausser der Grenze des Fortschritts) in Abrede stellt: der Reduktionismus, zu dem sich Hawking implizite bekennt: «Wenn es tatsächlich eine vollständige einheitliche Theorie gibt, würde sie wahrscheinlich auch unser Handeln bestimmen.»

Noch radikalere Vertreter dieser im Wissenschaftsbetrieb sehr häufig anzutreffenden Spezies behaupten, dass sich die Geschichte der Menschheit auf die Sozialwissenschaft, die Sozialwissenschaft auf die Psychologie, die Psychologie auf die Neurobiologie, die Biologie auf die Chemie, die Chemie auf die Physik und diese letztlich auf die GUT reduzieren lässt. (Dazu gibt es eine schweizerische Volksgeschichte: «Joggeli söll ga Birli schüttle».) Walter Heitler, Ordinarius für theoretische Physik an der Universität Zürich bis 1974, wandte sich in rund der Hälfte seiner tiefsinnigen naturphilosophischen Schriften gegen die Reduktion des Phänomens «Leben» auf Chemie und Physik (– übrigens auch gegen die Kernenergie): «Die mechanistische Weltansicht ist Schuld am Leben und Schuld am Menschen» (Heitler, 1970). Der ebenfalls in Zürich tätige Quantenchemiker Hans Primas gibt in einem Vortrag den vom Reduktionismus am häufigsten hypnotisierten Molekularbiologen zu bedenken, dass die Quantenmechanik, als zuständige Theorie für das Verhalten der molekular organisierten Materie, den Reduktionismus als Widerspruch zu einer komplementären Betrachtungsweise, wie sie die Quantenmechanik bedingt, entlarvt:

«Wenn man sich schon auf die Quantenmechanik als Grundlage beruft, muss man auch zur Kenntnis nehmen, dass gemäss unserem heutigen Verständnis dieser Theorie sowohl dem Atomismus als auch jeder reduktionistisch-mechanistischen Philosophie längst die naturwissenschaftliche Basis entzogen ist. Die materielle Welt ist keineswegs aufgebaut aus unabhängig existierenden Elementarsystemen, wie etwa Quarks, Elektronen, Atomen oder Molekülen, sie erlaubt lediglich unter ganz speziellen experimentellen Bedingungen eine Beschreibung durch solche kontextabhängigen Entitäten. Es gibt aber auch grundsätzlich andere, zur molekularen komplementäre Beschreibungen der Materie, welche quantentheoretisch genauso wohlbegründet und verbindlich sind. Das heisst, die Quantentheorie bietet viel reichere Möglichkeiten, als in der Weltansicht der Molekularbiologie zur Diskussion zugelassen sind» (Primas, 1987).

Die Idee der Komplementarität hat uns die Augen geöffnet, die Abgrenzungen im Gebäude der Naturwissenschaft nicht so sehr zwischen den Fächern Physik, Chemie und Biologie zu sehen als vielmehr in zueinander komplementären Betrachtungsweisen der Phänomene. Der Basler Biologe Adolf Portmann schildert die komplementäre Arbeitsweise der Biologie in einem schönen Gleichnis: «Wir betrachten das Leben der Organismen wie ein kompliziertes Drama, das vor uns aufgeführt wird. Dieser Aufführung kann ich entweder im Zuschauerraum beiwohnen oder hinter den Kulissen. Das sind zwei ganz verschiedene Standorte, und was man zu sehen bekommt, ist von jedem Orte aus etwas völlig anderes. Und auf beiden Standorten kann ich als

Zuschauer oder Zuhörer verweilen oder nach wissenschaftlichen Grundsätzen forschend mich verhalten» (Portmann, 1964). «Die Einheit der Naturwissenschaft kann nicht dadurch erreicht werden, dass aus dem komplizierten Gegenstand, der Biologie, nur der Teil herausgeschnitten wird, der mit den Methoden der Physik und Chemie zugänglich ist. Zur sinnlich erfassbaren Natur gehört das gesamte Reich des Lebens – zur Biologie gehört die Notwendigkeit, mit komplementären Arbeitsweisen auf verschiedenen Wegen die Tatsachen der Struktur sowohl wie die der Innerlichkeit zu erforschen» (Portmann, 1960).

Damit sind wir Martin Wagenscheins naturphilosophischem Ansatz schon sehr nahe gekommen. Es bedarf kaum der Erwähnung, dass auch er sich gegen den Reduktionismus stellt und dabei auf Heitler und Portmann verweist, auch auf Theodor Litt. Hans Primas hat er nicht mehr gekannt, aber ich zweifle nicht, dass sie sich einig gewesen wären. Wagenschein weist aber in erster Linie – und es würde mir nicht schwerfallen, dazu einige Dutzend Stellen aus seinem Werk zu zitieren – auf eine weitere fundamentale Grenze naturwissenschaftlicher Erkenntnis hin: «Ich empfehle deshalb, ausser der abstrakten Zone (die man sich <oben> vorstellen darf) und den Grenzzonen (den <seitlich> liegenden) eine andere Zone nicht zu vergessen. Sie ist *unten* anzusiedeln, sie ist die Zone, auf der alles ruht. Sie verbindet die grundlegenden naturwissenschaftlichen Erkenntnisse – ich meine damit die *zuerst* sich anbietenden – mit unseren Alltagserfahrungen, unserem Alltagsverstand. Und unserer *Alltagssprache* . . . Bildung gewinnt man nicht durch Einbruch ins oberste Stockwerk. Man muss unten hineingehen dürfen, wenn man auf gegründete Weise höherkommen will. Nur wenn wir sehen, wie unser *Wissen* sich bildet, kann es uns bilden» (W, 1970). Als das Zentrum seiner Arbeit bezeichnete Martin Wagenschein in seiner letzten Rede (vom 18. Sept. 1985) folgendes: Der Mensch darf durch seine Beschäftigung mit der Naturwissenschaft nicht gespalten werden. Die Wagenscheinsche Naturphilosophie ist eine Geisteshaltung, «in der es die Spaltung nicht gibt – nicht geben muss – zwischen den beiden Arten, die Natur zu sehen, der gemüthafte und der physikalischen» (W, 1986). Das gelingt nur, wenn der Mensch sich nicht blindlings dem naturwissenschaftlichen Standpunkt unterwirft – etwa durch eine unkritische Lektüre von Weinbergs «Ersten drei Minuten» –, sondern das naturwissenschaftliche Vorgehen «im Sinne eines bruchlosen, heilen Angliederns an das ursprüngliche und uneingeschränkte Einvernehmen mit der Natur» (W, 1965) versteht. Die naturwissenschaftliche Welt wurzelt in der Lebenswelt – wo denn sonst? Und aus dieser Lebenswelt, am Beispiel eines Saitenklangs, möchte ich nun versuchen, dasjenige, was naturwissenschaftlich erkennbar ist an diesem Klang, herauszuschälen.

3 Das Urphänomen der Akustik

«Fragt uns ein Tauber: Was ist das, der Klang einer Saite? – so können wir ihm unmöglich mitteilen, was wir hören» (W, 1965, 1980). Wir streichen oder zupfen die Saite an, und der Klang kann sich uns mitteilen, weil unser Gehör seinem Wesen entspricht. «Das Grundwort Ich-Du stiftet die Welt der Beziehung», schreibt Martin Buber. Erst wenn wir den Klang analysieren wollen, wenn wir etwas über ihn wissen wollen, machen wir ihn zum Gegenstand möglicher Erfahrung. «Die Welt der Erfahrung gehört dem Grundwort Ich-Es zu» (Buber, 1977). Oder der Naturwissenschaftstheoretiker Theodor Litt: «Von Ursprung her weiss der Mensch nichts von der scharfen Trennung, durch die das erkennende Subjekt sich von der als Objekt zu erkennenden Welt scheidet. Er weiss nichts von dem schroffen Gegenüber des sich zum denkenden Selbst straffenden Ich und der durch die Macht seines Denkens zu bezwingenden äusseren Wirklichkeit» (Litt, 1959). Aber das allein genügt nicht für das ungeübte Ohr. Wir müssen als handelnde Subjekte eingreifen: «Es bedarf des Tuns, um zu begreifen» (W, 1962). Wir müssen die Saite stören, und dabei geht das, was wir mit Fug und Recht Klang nennen, verloren. Nur wenn wir genau in der Mitte sanft auf die Saite tippen, erklingt ein Ton, der um eine Oktave höher liegt als der Grundton. Der Forschergeist erwacht, und wir probieren an anderen Stellen: Im Saitendrittel angetippt, steigt der Ton auf die Duodezime (die Quint über der Oktave), im Viertel auf die Doppeloktave und im Fünftel auf die grosse Terz darüber. Wenn wir nun genau in den Klang der ungestörten Saite hineinhorchen, dann vernehmen wir alle diese Obertöne, die gleichzeitig mit dem Grundton erklingen – und noch viel mehr. Ein einziger Saitenklang enthält alle Töne in sich – mundus in gutta. Die Obertöne geben dem Klang je nach ihrer Stärke seine Farbe, sein Timbre. Eine Flöte klingt anders als ein Cello, schlichter: Der Flötenklang enthält weniger Obertöne als ein Saitenklang. Ebenso enthält der Vokal «u» weniger Obertöne als das schrille «i».

Es war möglicherweise beim Suchen nach weiteren Klängen auf dem Monochord, als die Pythagoreer einen Zusammenhang entdeckt haben, der wohl die Initiation der mathematischen Naturwissenschaft war. Der St. Galler Harmoniker, Puppenspieler und Physiker Rudolf Stössel nennt diesen Zusammenhang «das Urphänomen der Akustik»: «Zwei gleichartige, gleich gespannte Saiten erzeugen Töne in einem konsonanten Intervall, wenn sich ihre Längen wie zwei kleine ganze Zahlen verhalten» (Stössel, 1982, 1987).

In der folgenden Tabelle ist das akustische Urphänomen an einigen Beispielen dargestellt:

Intervall	Seitenlängenverhältnis
Prime	1:1
Oktave	1:2
Quinte	2:3
Quarte	3:4

grosse Terz	4:5
kleine Terz	5:6
Sekunde:	
grosser Ganzton	8:9
kleiner Ganzton	9:10

Die Zahl 7 fehlt in dieser Tabelle. Sie ist die kleinste natürliche Zahl, die im Verhältnis mit einer anderen kleinen natürlichen Zahl kein konsonantes Intervall bildet. Man nennt die 7 die «erste ekmelische Primzahl» – «ekmelisch» heisst: ausserhalb des «Melos» (Stössel, 1987).

Vergleichen wir die Intervalle mit den Obertönen – die Oktave als erster Oberton legt diesen Vergleich nahe –, so erkennen wir sofort folgende Entsprechungen: Die Quinte ist der um eine Oktave heruntergeholte 2. Oberton, und die grosse Terz ist der um zwei Oktaven heruntergeholte 4. Oberton. Bis zum fünften Oberton (das ist der sechste Teilton) stehen diese untereinander und zum Grundton in konsonanten Verhältnissen.

Da wir nun schon im Vorhof der Mathematik sind, setzen wir an einem Beispiel die Intervalle und die Längenverhältnisse ihrerseits in Relation:

Intervalle	Längenverhältnisse
Quinte + Quarte = Oktave	$(2:3) \cdot (3:4) = 1:2$
Quinte – Quarte = Sekunde	$(2:3) : (3:4) = 8:9$

Addieren oder subtrahieren wir die Intervalle, müssen wir die Längenverhältnisse multiplizieren oder dividieren: Zwischen den musikalischen Intervallen und den ihnen entsprechenden Saitenlängenverhältnissen besteht ein Zusammenhang, den die Mathematiker logarithmisch nennen. Weil die musikalischen Intervalle unser Gemüt ansprechen, ihre Hervorbringung unser Handeln erfordert und die Zahlenverhältnisse unseren Geist herausfordern, nenne ich diesen Zusammenhang den «menschlichen Logarithmus».

4 Der physikalische Aspekt eines Saitenklangs

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse führen nun aber keineswegs zwangsläufig zur physikalischen Analyse der Klänge. Mindestens drei Pfade zeigen sich, denen zu folgen in unserem Ermessen liegt:

1) Die Harmonielehre als Teil der Musiktheorie untersucht den Aufbau von Akkorden und deren Beziehungen untereinander. Sie hat es ausschliesslich mit der Intervallhälfte unserer Tabellen zu tun.

2) Nicht zu verwechseln mit der Harmonielehre ist die Harmonik. Die Harmoniker interessieren sich für die rechte Hälfte unserer Tabellen: Sie suchen einfache Zahlenverhältnisse in der Musik, der Geometrie, im Mineralischen und Organischen, in der Architektur und der bildenden Kunst. Über die Herkunft der Harmonik schreibt der Mathematiker van der Waerden:

«Die Pythagoreer lehrten, dass jeder Planet bei seiner Kreisbewegung einen Klang erzeugt, einen einzigen Ton, und dass diese Töne eine *Harmonie* bilden, d. h. eine wohlgeordnete, wohlklingende Tonleiter . . . Für die älteren Pythagoreer ist die Himmelsmusik kein natürliches, sondern ein mystisches, göttliches Ereignis. Dass wir diese Musik nicht hören können, fanden sie ganz natürlich, aber dass Pythagoras sie «unmittelbar an der Quelle» zu hören vermag, das erschien ihnen wunderbar» (van der Waerden, 1979). Schon der Titel seines Hauptwerks «*Harmonice Mundi*» zeigt, dass Johannes Kepler in erster Linie ein Harmoniker war und erst dann – quasi nebenamtlich – ein Physiker.

3) Weder die Harmonielehre noch die Harmonik erheben den Anspruch, das Phänomen «Klang» zu begründen oder nach seinem Wesen zu befragen. Fragen wir nun den Physiker Martin Wagenschein: «Was ist also ein Klang in Wirklichkeit?» – «Die Antwort ist gefunden und kann leicht von jedem geprüft werden. Wenn ein Ding tönt, eine Geige zum Beispiel, so ist immer ein Teil an ihr zu finden, das sich schnell und regelmässig hin und her bewegt. Ein Ton entsteht also durch eine regelmässig schwingende Bewegung eines Körpers oder eines Teils an ihm. Und seine Ausbreitung ist das Fortlaufen der Luftstösse, die durch diese Bewegung erzeugt werden. Dies eben Beschriebene geschieht auch dann, wenn niemand es hört, wenn niemand dabei ist. Es ist also das allein Wirkliche am Schall. Was wir *hören* dagegen, ist nur eine Empfindung, die das Ohr uns vorzaubert, sobald es von diesen Luftstössen getroffen wird. Die *wirkliche* Welt, die Welt an sich, ist stumm» (W, 1965, 1980).

Sie staunen? Nun ja, an seiner Sprache erkennt man ihn. Aber sagt er da nicht dasselbe über den Klang wie Weinberg und Hawking über das Universum? Allerdings steht der Wagenschein-Text unter dem Untertitel «Irreführung». Denn wenige Seiten später finden wir ein Konzentrat dessen, was ich Wagenscheins naturphilosophischen Ansatz nennen möchte – exemplarisch, natürlich: «Dass die Saite der Geige tönt, ist nicht nur zu *hören*, es ist auch zu sehen und mit den Fingern zu tasten . . . Das gilt für jeden Ton. Es ist – grundsätzlich – immer möglich, seine Schwingungen auch zu sehen und zu tasten.

Der Taube kann *nur* sehen und tasten. Dadurch können wir ihm einen Hinweis darauf geben (nicht: was ein Ton *ist*, aber doch:), was zu einem Ton «dazugehört». Seine Welt ist ärmer als die unsrige. In unserer vollständigen Welt ist ein jedes Ding zu tönen fähig, in seiner nicht, es kann nur zittern.

Trotzdem haben wir, wenn wir sagen: «Schall ist Bewegung», nicht die sinnliche Welt verlassen und sind einer absoluten Welt nicht nähergekommen. Denn: «Erklären» ist ja immer nur ein «Inbeziehungsetzen zu anderem», Bekannterem, Erwünschterem. Das ist hier: Tasten und Sehen. Aus der Welt der Sinne kommen wir aber dabei nicht heraus, weder in der Tat noch in der Vorstellung. Deshalb ist es falsch zu sagen, was der Schall «an sich» sei. Wir haben nur erkannt, was er für Auge und Hand ist!

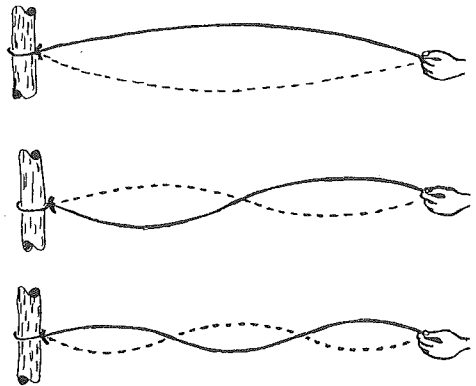
Wenn wir sagen: «Schall ist Bewegung», so klingt das zwar sehr absolut, sehr «abgelöst» von Auge und Hand und verführt deshalb zu Worten wie: «an

sich» und «Wirklichkeit». Das darf aber nicht darüber wegtäuschen, dass der grundlegende Tatbestand auf Empfindungen des Auges und der Hand beruht, aus denen wir durch ein besonderes eingeborenes Vermögen die nur scheinbar freischwebenden Begriffe der Bewegung in Raum und Zeit bilden. Wenn wir also die Begriffe «es gibt», «ist in Wirklichkeit», «an sich» vermeiden, weil sie so leicht unscharf und verschwommen werden, so schälen wir aus den Sätzen: «Ton an sich ist Schwingung; die wirkliche Welt ist also stumm» als eigentlichen Gehalt heraus: Mit jeder Tonempfindung ist die Möglichkeit fest verbunden (ihr zugeordnet), eine Schwingung zu sehen oder zu tasten» (W, 1965, 1980).

Innerhalb des Begriffshorizonts der Physik können wir nun fragen: Wie kommt es, dass sich immer dieselbe Tonhöhe einstellt, wenn wir eine Saite irgendwo und irgendwie anklopfen, anzupfen oder mit dem Bogen kratzen? Das muss an der Saite selbst liegen: Aber nicht nur die Saitenlänge, sondern auch die Spannung und die Masse bestimmen die Tonhöhe. Klaviersaiten für Basstöne werden mit Kupferdraht umspinnen, um ihre Masse zu vergrössern. Um diese Zusammenhänge besser untersuchen zu können, betrachten wir die Schwingungsvorgänge in Zeitlupe. Wir interessieren uns nun überhaupt nicht mehr für den Klang – typisch Physiker! Wenn ich in den Bergen eine dieser einfachen Seilbahnen sehe, die von Alp zu Alp führen, kann ich der Versuchung, heftig auf das Seil zu klopfen, nicht widerstehen. Sogleich flieht der Buckel dem Seil entlang, als wäre der Teufel hinter ihm her. Nach einer Weile kommt er wieder zurück, aber so, als hätte jemand bei der anderen Station genau spiegelbildlich wie ich auf das Seil geklopft. Ein heftiger, kurzer Ruck – und schon saust er wieder davon, und zwar wieder auf der ursprünglichen Seite. Der Buckel saust also hin und her und wechselt bei jedem Umkehrpunkt den Ausschlag. Wäre das Seil unendlich lang, hätte er keinen Grund, zurückzukehren: Es ist die geometrische Begrenztheit, welche die Periodizität schafft. Die Ausbreitung des Buckels dagegen ist ein Spiel von Kraft und Trägheit. Wenn wir nämlich das

Seil stärker spannen – wir können das an einem langen Gummischlauch zeigen –, läuft der Buckel schneller, er braucht weniger Zeit für sein Hin und Her, die Frequenz dieses periodischen Vorgangs wird höher.

Und vom Stimmen der Saiteninstrumente wissen wir: Je stärker wir eine Saite spannen, um so höher wird der Ton. Die physikalisch relevante Grösse für die Tonhöhe ist also die Frequenz, d. h. die Anzahl Schwingungen



pro Zeiteinheit. Der Gummischlauch kann aber auch nach anderen Mustern schwingen als dem elementaren Hin und Her des Buckels. Die folgenden Schwingungsformen können wir durch immer schnelleres Schütteln der Hand, welche das eine Ende des Schlauches hält, anregen.

Bei doppelter und dreifacher Frequenz finden wir in der Mitte bzw. den Dritteln des Schlauches Stellen, die nicht schwingen. Man nennt sie Schwingungsknoten. Durch das Antippen dieser Stellen an der Saite haben wir Obertöne aus dem Klang gelockt: die Oktave und die Duodezime.

Wenn wir sagen, wir können Seilwellen oder Saitenschwingungen auf Kraft und Trägheit zurückführen, so meinen wir mit diesen Begriffen keineswegs magische Wesenheiten, welche die Natur regieren. Vielmehr erfanden Galilei, Newton, Huygens usw. diese Begriffe und andere wie «Gravitation», «Bewegungsgrösse» usw. Damit schufen sie eine zweite abstrakte Natur, eine Modellnatur oder ein Naturmodell. Und erst in dieser abstrakten geistigen Welt sind die gesetzmässigen Zusammenhänge zu erkennen: Nicht nur Saitenschwingungen und Seilwellen, auch Wasser- und Schallwellen, aber auch die Bewegung fallender oder geworfener Körper sowie der Lauf des Mondes und der Planeten sind als Spiel von Kraft und Trägheit zu verstehen. Diese abstrakte Welt ist das mechanische Universum. Über diese Art von Naturverständnis schrieb Werner Heisenberg: «Die Entdeckung, dass hier etwas Gemeinsames vorliegt, auf das man, unter Absehen von allen anderen tiefergehenden Unterschieden, den Blick richten konnte, gehört zu den folgenschwersten Ereignissen in der Geschichte der Naturwissenschaft» (Heisenberg, 1971).

Die Physik zeigt aber stets auch, dass die Welt nie ganz so ist, wie sie der Platoniker gerne hätte: Wenn nämlich die Saite bei der Schwingung ausgelenkt ist, so ist sie ihrer Elastizität wegen ein wenig stärker gespannt, als wenn sie ruht. Wir können uns dazu den gewölbten Bauch der Grundschwingung vorstellen. Und auf diesem stärker gespannten Bauch muss sich nun die Schwingung, die dem ersten Oberton entspricht, entfalten. Ihre Frequenz wird deshalb ein wenig grösser sein als das Doppelte der Grundfrequenz. Der erste Oberton erklingt also um eine Winzigkeit höher als die Oktave – und so geht es allen Obertönen. Aber vielleicht sind es gerade diese kleinen Abweichungen von der Harmonizität, welche dem Klang seine «Wärme» geben (Blackham, 1988).

5 Der physikalische Aspekt des Lichtes

Martin Wagenschein hat uns auch geholfen, Sätze wie «Wärme ist nichts als Molekularbewegung» und «Licht ist nichts als elektromagnetische Welle beziehungsweise Photonenschauer» geistig zu reinigen. Während ich mir bei meinem Physikstudium gar keine Gedanken über die Reduktion der Wärme auf Bewegung gemacht habe, hat mich die mechanistische Deutung des Lichts nicht nur ihrer Doppelnatur wegen irritiert: Wie soll man sich diese Lichtwel-

len vorstellen? Die Maxwellsche Mathematik sagt, dass der magnetische Feldvektor stets senkrecht zum elektrischen Feldvektor schwingt. Was ist das Wesen dieser Vektorpfeile, wie lang sind sie, und was ist ausserhalb? Aber solche Gedanken verwirren den Physikstudenten nicht lange: Die relativ komplizierte Mathematik der Wellenoptik narkotisiert philosophische Reflexionen. Erst Wagenscheins naturphilosophisches Prosagedicht «Das Licht und die Dinge» (W, 1965, 1980) weckte meinen Geist für das latent Gewusste, nämlich, dass man das Licht gar nicht sehen kann, dass es gar nicht «aussieht», dass es gar keiner mechanistischen Begründung bedarf! Damit sind wir bei Goethes Auffassung vom Licht: «Licht und Geist, jenes im Physischen, dieser im Sittlichen herrschend, sind die höchsten dankbaren unteilbaren Energien» (Goethe: Maximen und Reflexionen Nr. 1299). Fragen wir den Physiker Wagenschein nach dem Wesen des Lichts: «Das Licht (ist) weder Welle noch Geschosshagel. Wir dürfen nur sagen: Unter gewissen experimentellen Umständen zeigt sich das Licht unter dem Gleichnis oder, wie die Physiker sagen, dem <Bild> eines Wellenzuges; und unter anderen Umständen sind wir gezwungen, das Bild feiner fliegender Partikel zu wählen» (W, 1970). In der etwas akademischen Sprache von Niels Bohr tönt dieser Sachverhalt wie folgt: «Die Kontinuität der Lichtfortpflanzung in Zeit und Raum einerseits und der atomare Charakter der Lichtwirkungen andererseits müssen als komplementär aufgefasst werden, in dem Sinn, dass jede für sich wichtige Züge der Lichtphänomene zum Ausdruck bringt, die, selbst wenn sie vom Standpunkt der Mechanik aus unvereinbar sind, niemals in direkten Gegensatz kommen können, da eine eingehendere Analyse des einen oder anderen Zuges auf Grund mechanischer Vorstellungen verschiedene, sich gegenseitig ausschliessende Versuchsanordnungen erfordert» (Bohr, 1958). Der scheinbare Widerspruch des Welle-Teilchen-Dualismus löst sich in nichts auf, wenn wir das Licht und die Elementarteilchen, kurz, die Objekte und Phänomene der Quantenphysik nicht wie die Objekte und Phänomene der klassischen Physik als unabhängig voneinander existierende Wesen betrachten. Bohr schreibt dazu: «Für die objektive Beschreibung ist es angebracht, das Wort <Phänomen> nur in bezug auf Beobachtungen anzuwenden, die unter genau beschriebenen Umständen gewonnen wurden und die Beschreibung der ganzen Versuchsanordnung umfassen» (Bohr, 1958). Lichtwellen, Photonen, Atome, Elektronen, Quarks usw. gehören – in Wagenscheins Sprache – der zweiten Natur an. Sie gehören nicht zur Welt der Sterne und Wolken, der Häuser und Blumen. Physik ist «eine begriffliche Umkonstruktion der Wirklichkeit» (W, 1962).

In der Schule muss man aber keineswegs die Maxwellsche Theorie oder gar die Quantentheorie behandelt haben, um den ersten Schritt einer naturphilosophischen Betrachtung des Lichts zu tun. Um das zu zeigen, lese ich Ihnen eine Prüfungsarbeit in Physik vor, die an einem Zürcher Gymnasium verfasst wurde. Die Autorin war damals im achten Schuljahr und hatte erst einige Wochen Physik. Sie schreibt an ihre Schwester:

«Es gibt viele Dinge, die man nicht sieht, aber doch da sind. Zum Beispiel

ein Spiegel. Siehst Du einen Spiegel? Du wirst jetzt sicher sagen: «Aber ja, natürlich sehe ich einen Spiegel!» Aber siehst Du ihn wirklich? Man sieht nur, was er gerade reflektiert, er sieht immer anders aus, aber Du siehst nur, was er reflektiert, den eigentlichen Spiegel siehst du nicht! Und wie ist das mit dem Licht, wie schaut Licht aus? Auch Licht siehst Du nicht! Seltsam, das Licht sieht man nicht, aber ohne Licht würde man nicht sehen! Alles reflektiert Licht, ausser schwarze Dinge. Diese absorbieren (verschlucken) das Licht. Zum Beispiel ein weisser Pullover reflektiert das ganze Licht wieder, genau wie der Spiegel, aber warum ist dann der Pullover nicht auch ein Spiegel und der Spiegel weiss? Der Spiegel ist glatt und reflektiert somit alles im gleichen Winkel, wie es gekommen ist. Der Pullover ist rau, man könnte ihn mit Tausenden von kleinen Spiegelchen vergleichen, die das Licht somit wieder in alle Richtungen verstreuen, genau wie Schnee. Eine einzige Schneeflocke ist ein «Spiegel», eine ganze Schneedecke sieht man aber weiss. Es ist schon eigenartig, was man so sieht und was man nicht sieht! Auch ein Loch ist so etwas. Kannst Du mir sagen, wie ein Loch aussieht? Man sieht es eigentlich auch nicht, es sieht im Dunkeln und im Licht gleich aus. Rote Dinge sehen im roten Licht am hellsten aus, grüne Dinge im grünen Licht und blaue Dinge im blauen Licht. Das Loch aber sieht immer gleich aus. Es kann gar nie heller sein, auch im stärksten Licht nicht. Was meinst Du dazu?»

6 Die rätselhafte Ordnung des Kosmos

Das Bildende im Umgang mit Physik ist in erster Linie die Entdeckung, dass die Natur verstehbar ist: «Das ewig Unbegreifliche an der Natur ist ihre Begreiflichkeit», sagte Einstein (nach W, 1962). Martin Wagenschein hat den Elementarakt des Verstehens in einem hübschen Gleichnis beschrieben: «Verstehen heisst: einen Fremden bei näherer Betrachtung als einen nur verkleideten alten Bekannten wiedererkennen» (W, 1970, 1980). Nach einem Kurs, an dem meine Wagenschein-Bücher den Teilnehmern zur Verfügung standen, fand ich die ersten beiden Silben des Wortes «wiedererkennen» unterstrichen – und dahinter mit Bleistift in griechischen Buchstaben «Anamnesis». Diese Bemerkung hat mich sogleich an einen Text von Wolfgang Pauli erinnert, den ich Ihnen nicht vorenthalten möchte: «Der Vorgang des Verstehens der Natur sowie auch die Beglückung, die der Mensch beim Verstehen, d. h. beim Bewusstwerden einer neuen Erkenntnis empfindet, scheint demnach auf einer Entsprechung, einem Zur-Deckung-Kommen von präexistenten inneren Bildern der menschlichen Psyche mit äusseren Objekten und ihrem Verhalten zu beruhen. Diese Auffassung der Naturerkenntnis geht bekanntlich auf Plato zurück und wird auch von Kepler in sehr klarer Weise vertreten. Dieser spricht in der Tat von Ideen, die im Geist Gottes präexistent sind und die der Seele als dem Ebenbild Gottes mit-ein-erschaffen wurden. Diese Urbilder, welche die Seele mit Hilfe eines angeborenen Instinktes wahrnehmen könne,

nennt Kepler *archetypisch*. Die Übereinstimmung mit den von C. G. Jung in die moderne Psychologie eingeführten ... *Archetypen* ist eine sehr weit gehende. Indem die moderne Psychologie den Nachweis erbringt, dass jedes Verstehen ein langwieriger Prozess ist, der lange vor der rationalen Formulierbarkeit des Bewusstseinsinhaltes durch Prozesse im Unbewussten eingeleitet wird, hat sie die Aufmerksamkeit wieder auf die verbewusste, archaische Stufe der Erkenntnis gelenkt. Auf dieser Stufe sind an Stelle von klaren Begriffen Bilder mit starkem emotionalem Gehalt vorhanden, die nicht gedacht, sondern gleichsam malend geschaut werden» (Jung, Pauli, 1952; Pauli, 1961).

Nebenbei lässt uns der Pauli-Text die Bedeutung der oft geschmähten «animistischen» Sprechweise Wagenscheins, aber auch sein Interesse an «Kindern auf dem Wege zur Physik» (W, 1973) in einem neuen Licht sehen: Bilder von starkem emotionalem Gehalt gelten für einen der grössten Physiker *unseres* Jahrhunderts als Voraussetzung für das Verständnis der Natur. Ähnlich drückt sich Heisenberg aus: «Wer über die Philosophie Platos meditiert, weiss, dass die Welt durch Bilder bestimmt wird» (Heisenberg, 1969).

Der platonische Erkenntnisansatz führt auf einen Urgrund: Es gibt eine unserer Willkür entzogene Ordnung des Kosmos, der «sowohl die Seele des Erkennenden als auch das in der Wahrnehmung Erkannte ... unterworfen sind» (Jung, Pauli, 1952). «Diesen Einheitsaspekt des Seins hat C. G. Jung mit dem Terminus *Unus Mundus* bezeichnet ... Und Jung vermutete, dass der Archetypus der natürlichen Zahlen mit dem *Unus Mundus* speziell verbunden sein könnte» (von Franz, 1970). Von dieser geheimnisvollen Ordnung spricht auch Wagenschein (W, 1970, 1980): «Im bildenden Umgang mit der Natur erfahren wir zwei Autoritäten:

- 1) in uns selbst die Autorität der mathematischen Logik,
- 2) ausser uns die Tatsache, «dass die Mathematik auf die Dinge unserer Erfahrung passt» (Heisenberg, 1955). Dazu kommt
- 3) die rätselhafte Einigkeit beider Autoritäten.» Wagenschein fragt sich: «Was könnten wir denn machen, wenn die Natur nicht geruhte, darauf einzugehen, dass wir mathematisch fragen?
- 4) Als Gesamtergebnis: Die physikalisch betrachtete Natur enthüllt eine *Ordnung*. Sie gibt einen Beitrag zum Wichtigsten, was wir zum Leben brauchen: zum Vertrauen und Selbstvertrauen.»

7 Literatur

- Niels Bohr: Atomphysik und menschliche Erkenntnis I, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1958.
- E. Donnell Blackham: Klaviere, in «Die Physik der Musikinstrumente», Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1988.
- Martin Buber: Ich und Du, Verlag Lambert Schneider, Heidelberg, 1977.
- Marie-Louise von Franz: Zahl und Zeit; Psychologische Überlegungen zu einer Annäherung von Tiefenpsychologie und Physik, Klett Verlag, Stuttgart, 1970.
- Stephen Hawking: Eine kurze Geschichte der Zeit; Die Suche nach der Urkraft des Universums, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, 1988.
- Werner Heisenberg: Das Naturbild der heutigen Physik, Rowohlt's deutsche Enzyklopädie, Bd. 8, 1955.
- Werner Heisenberg: Der Teil und das Ganze; Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper Verlag, München, 1969.
- Werner Heisenberg: Schritte über Grenzen; Gesammelte Reden und Aufsätze, Piper Verlag, München, 1971.
- Walter Heitler: Naturphilosophische Streifzüge, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1970.
- Gerhard Huber: Philosophische Fragen zum Darwinismus, Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 126/1: 3–17, 1981.
- Carl Gustav Jung und Wolfgang Pauli: Naturerklärung und Psyche, Rascher Verlag, Zürich, 1952.
- Theodor Litt: Naturwissenschaft und Menschenbildung, Quelle und Meyer Verlag, Heidelberg, 1959.
- Wolfgang Pauli: Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1961.
- Adolf Portmann: Neue Wege der Biologie, Sammlung Piper, München, 1960.
- Adolf Portmann: Probleme des Lebens; Eine Einführung in die Biologie, Verlag Friedrich Reinhardt, Basel, 1964.
- Hans Primas: Biologie ist mehr als Molekularbiologie, Beitrag zur Vortragsreihe «Was ist Leben?» Zum 100. Geburtstag von Erwin Schrödinger im Rahmen des Studium Generale der Universität Konstanz, Wintersemester 1987/88.
- Rudolf Stössel: Harmonikale Faszination, Schriften zur Harmonik Nr. 7, herausgegeben vom «Kreis der Freunde um Hans Kayser», Bern, 1982.
- Rudolf Stössel: Wege zur Harmonik, Schriften zur Harmonik Nr. 15, herausgegeben vom «Kreis der Freunde um Hans Kayser», Bern, 1987.
- B. L. van der Waerden: Die Pythagoreer, Artemis Verlag, Zürich, 1979.
- Martin Wagenschein: Die pädagogische Dimension der Physik, Westermann Verlag, Braunschweig, 1962.
- Martin Wagenschein: Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken I, Klett Verlag, Stuttgart, 1965.
- Martin Wagenschein: Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken II, Klett Verlag, Stuttgart, 1970.
- Martin Wagenschein: Verstehen lehren, Beltz Verlag, Weinheim und Basel, 1968; ergänzte Auflage 1989.
- Martin Wagenschein, Agnes Banholzer, Siegfried Thiel: Kinder auf dem Wege zur Physik, Klett Verlag, Stuttgart, 1973.
- Martin Wagenschein: Naturphänomene sehen und verstehen, herausgegeben von Hans Christoph Berg, Klett Verlag, Stuttgart, 1980.
- Martin Wagenschein: Die Sprache zwischen Natur und Naturwissenschaft, Jonas Verlag, Marburg, 1986.
- Steven Weinberg: Die ersten drei Minuten; Der Ursprung des Universums, Piper Verlag, München, 1977.