Musik entsteht im Kopf:
Zur Psychoakustik und Psychologie der Musikwahrnehmung

von Eckart Altenmüller

1. Musik ist Schall

Musik ist ein Teil des schwingenden Weltalls.

Ferrucio Busoni[1]

Bei nüchterner Betrachtung ist Musik nichts anderes als ein auf Schwingungen beruhendes physikalisches Phänomen. In unserem Seelenleben spricht Musik aber ganz besondere Dimensionen an: Wir werden von einer schönen Melodie tief bewegt, ein ausdrucksvoller Gesang vermag uns zu Tränen rühren und die majestätischen Einsätze der Blechbläser in einer Wagner-Oper lassen manchen Zuhörer eine Gänsehaut verspüren. Wir erfreuen uns am Nacheinander und Miteinander der musikalischen Themen und Motive und an der unendlichen Vielfalt all dieser Erscheinungen. Im Folgenden sollen die einzelnen Schritte der Musikwahrnehmung genauer untersucht und dazu erst einmal das Phänomen „Schall" in Grundzügen erläutert werden. Einige physikalische Fakten werde ich hier nicht auslassen können, aber diese etwas trockene Übung soll auf das Notwenige beschränkt bleiben.

Musik ist Schall, und das Medium, in dem Musik stattfindet ist Luft. Im täglichen Leben versteht man unter Schall periodische Luftdruckschwankungen, die sich wellenförmig ausbreiten und dabei Verdichtungen und Verdünnungen der Luftmoleküle bewirken. Die Geschwindigkeit, mit der sich diese Schallwellen fortpflanzen, hängt von der Dichte des Mediums ab. Auf Meereshöhe am Strand liegt die Schallgeschwindigkeit an einem klaren, trockenen Wintertag mit Temperaturen um den Gefrierpunkt bei 331 Metern pro Sekunde. An einem schwülen Sommerabend mit 25 Grad Celsius Temperatur und 80% Luftfeuchtigkeit breitet sich der Schall an der gleichen Stelle aufgrund der höheren Dichte des Mediums deutlich schneller, nämlich mit ca. 345 Metern pro Sekunde aus. Die Luftmoleküle bewegen sich bei der Schallausbreitung nicht fort, sondern schwingen um eine mittlere Ruhelage hin und her. Da diese Schwingungen nicht chaotisch und ungeordnet sind, sondern in der Richtung der Schallausbreitung erfolgen, spricht man auch von Longitudinalwellen. Die Häufigkeit oder „Frequenz", mit der diese Luftmolekülschwingungen hin und her schwingen wird in Hertz, abgekürzt Hz, angeben. Ein Hertz entspricht also einer Schwingung pro Sekunde. Schnelle Schallschwingungen mit einer hohen Frequenz werden als hoch empfunden, solche mit einer niedrigen Frequenz als tief. Der Hörbereich zwischen den tiefsten, gerade noch wahrnehmbaren und den höchsten Tönen liegt beim gesunden, jugendlichen Hörer zwischen 20 und 20'000 Hz. Schall mit Frequenzen unter 20 Hz wird als Infraschall bezeichnet, über 20'000 Hz als Ultraschall. Viele Tiere kommunizieren übrigens in diesen für uns Menschen nicht hörbaren Schallbereichen: Junge Mäuse stoßen z. B. in Stress-Situationen bei der Trennung von der Mutter Verzweiflungslaute zwischen 50'000 und 70'000 Hertz aus, Wale kommunizieren bekanntermaßen über Entfernungen von hunderten von Kilometern mit Infraschall unter 20 Hz.

In unserer Kultur nimmt bereits ab dem jungen Erwachsenenalter die Wahrnehmungsfähigkeit für hohe Frequenzen ab. Ein 25-Jähriger hört meist die störenden hohen Nebengeräusche eines alten Fernsehers nicht mehr. Sie liegen bei ca. 15'000 Hz und sind durch die Zeilenfrequenz des Bildaufbaus bei 50-Hz-Röhrenfernsehern bedingt. Die weit verbreitete Hochtonschwerhörigkeit des Alters wird auf die im Laufe des Lebens erfolgte Belastung durch schädliche Schalldruckpegel zurückgeführt und scheint bei Naturvölkern nicht aufzutreten. Der Verlust der Wahrnehmung für Frequenzen über 10'000 Hertz wird allerdings meist nicht als störend empfunden. Der höchste Klavierton, das fünfgestrichene c (c´´´´´ oder c5) liegt bei etwa 4'000 Hz. Hört man Frequenzen über 10'000 Hz nicht mehr, dann kann eine geringe Einbuße von Brillanz im Klang bemerkbar sein. Da sich der kulturell bedingte Hörverlust jedoch schleichend einstellt, wird dies in der Regel im wörtlichen Sinn „überhört".

Die Lautstärke hängt von der Auslenkung oder „Amplitude" der entstehenden Luftdruckschwankungen ab und wird als Schalldruckpegel in Dezibel (dB) angegeben. Die Amplitude ist dabei ein direktes Maß für die Intensität des Schalldruckes. Willkürlich wurde festgelegt, dass der Schalldruck, der von einem gesunden 20-jährigen Hörer in der Tonhöhe von 1000 Hz gerade noch gehört wird, 0 Dezibel entspricht. Physikalisch bezeichnet das Maß „Pascal" den Schallduckpegel: Ein Pascal ist die Kraft von einem Newton, das auf einen Quadratmeter Fläche wirkt. Um dieses abstrakte Maß zu verdeutlichen, sei ein Vergleich gewagt: ein Gewicht

1 Ferrucio Busoni,. Entwurf einer neuen Ästhetik der Tonkunst. Suhrkamp Frankfurt 1974 Seite 18

von 98 Gramm übt durch die Erdanziehung eine Kraft von einem Newton aus. Für die Wahrnehmung des 1'000-Hz-Tones genügt ein Schalldruckpegel von 0,000'02 (2 x 10-5) Pascal, das würde als Gewicht eine Auslenkung von 0.000'002 Gramm auf der Waage bedeuten. Der Intensitätsumfang, der vom menschlichen Ohr verarbeitet werden kann, ist sehr groß. So bedeutet der Abstand zwischen dem gerade noch hörbaren Ton von 1000 Hz mit 0 dB und dem über der Schmerzgrenze liegenden Brausen eines Düsentriebwerkes aus nächster Nähe mit 140 dB eine Steigerung des physikalischen Schalldruckes um sieben Zehnerpotenzen, d. h. es entsteht ein Verhältnis von 1 : 10'000'000! Man kann sich diese Größenverhältnisse am Beispiel von Gewichten gut verdeutlichen: Eine dem Messbereich des menschlichen Ohres entsprechende Waage müsste in der Lage sein, ein Gewicht von einem Gramm genau so exakt zu wiegen wie 10'000'000 Gramm, was zehn Tonnen entspricht.

Die Berechnung des Schalldrucks in Dezibel folgt einer logarithmischen Formel (Schalldruckpegel L = 20 log Pa(x)/Pa(0) Dezibel (dB), wobei Pa(x) der gemessene Schalldruck in Pascal ist und Pa(0) der Bezugsschalldruck von 0 dB bei 1'000 Hz). Um diese Formel anschaulich zu machen, seien hier einige Beispiele angeführt: eine Verdoppelung des Schalldrucks entspricht nicht einem Zuwachs von 20 dB auf 40 dB, sondern von 20 auf 26 dB, der dreifache Schalldruck bedeutet einen Zuwachs um 10 dB und der zehnfache einen Zuwachs um 20 dB. Zwei nebeneinander stehende Trompeter mit einem Schalldruck von je 80 dB verursachen nicht eine Verdopplung auf 160 dB, sondern nur eine Zunahme um 3 dB, das heißt der Gesamtschalldruck beträgt 83 dB. Die Verdoppelung des Abstandes von einer Schallquelle führt zu einer Reduzierung des Schalldruckpegels um 12 dB – was nur noch einem Viertel der ursprünglichen Schalldruckstärke entspricht. In ***Tabelle 1*** sind typische Schalldruckpegel von Alltagsgeräuschen und von Klängen im musikalischen Kontext angegeben. Dabei ist zu beachten, dass mögliche die Gesundheit gefährdende Hörschäden nicht nur von dem Schalldruckpegel abhängen, sondern auch von der Dauer der Beschallung. Generell ist an einem Industriearbeitsplatz eine durchschnittliche Lärmeinwirkung von 85 dB über 40 Wochenstunden noch erlaubt. Ab 85 dB ist die Bereitstellung eines geeigneten Hörschutzes erforderlich, ab 90 dB ist das Tragen von Gehörschutz vorgeschrieben. Eine detaillierte Auflistung der arbeitsmedizinischen Maßnahmen zur Vorbeugung

dB	Mittlerer Pegel	Spitzenpegel	Entfernung
180		Spielzeugpistolen	direkt am Ohr
170		Ohrfeige	
160		Airbag-Entfaltung	im Fahrgastraum
130		Händeklatschen	1 m
126		Piccolo-Flöte, Fortissimo a''''	am Ohr des Spielers
120		Schmerzschwelle Opernsänger der Mailänder Scala	am Ohr 1 m vor der Mundöffnung
110	laute Diskothek		auf der Tanzfläche
106	Haydn-Symphonie 1.Satz		am Ohr der Holzbläser
105		Knochenflöte gespielt mit maximaler Anblasstärke	1 m Entfernung
83-95	Orchestermusik der Hamburger Philharmoniker		in Kopfhöhe 40 cm vom Kopf des Musikers entfernt
38-84	Klaviermusik des Pianisten Sjatoslav Richter		im Saal des Moskauer Konservatoriums, etwa 20 m vom Flügel entfernt
70	Straßenverkehr einer Großstadt		10 Meter von der Strasse entfernt
60	normale Unterhaltung		im Zimmer
40	ruhige Großstadtwohnung nachts		im Zimmer
25	Atemgeräusche		1 m Entfernung
0	Hörschwelle des gesunden Ohres		

Tab. 1: Schallpegel verschiedener akustischer Ereignisse

von Hörschäden kann hier nicht erfolgen, es sei auf die informativen Bücher von Wickel und Hartogh[2] und von Bernhard Richter und Kollegen[3] verwiesen.

Neben dem physikalischen Maß "Lautstärke", das als Schalldruckpegel in Dezibel angegeben wird, gibt es ein subjektives Maß der empfundenen Schallstärke, das man in Phon angibt und durch vergleichende Messungen an Hörgesunden ermittelt hat. Dazu bewerteten zahlreiche Versuchspersonen, bei welchem Schalldruck sie einen Ton als gleichlaut zu einem Ton von 1'000 Hz empfanden. Bei allen gespielten Tönen wurde die subjektive Hörschwelle willkürlich auf den Wert „4 Phon" festgelegt. Die Phonskala gibt Auskunft über das gleiche Lautstärkeempfinden beim Vergleich zweier Töne unterschiedlicher Frequenz. Bei 1000 Hz entsprechen sich nach der Definition die Angaben in Phon und in Dezibel, das heißt, ein Ton mit einem Schalldruckpegel von 80 dB hat auch einen subjektiven Lautstärkewert von 80 Phon. Sehr starke Abweichungen der subjektiven Lautstärkeskala von der physikalischen Dezibelskala findet man aber an den Grenzen des Hörbereichs. So muss ein sehr hoher Ton um 8'000 Hz, um gleichlaut empfunden zu werden wie der physikalische Normton von 1'000 Hz einen um ca. 10 Dezibel höheren Schalldruckpegel aufweisen. Noch deutlicher wird das im Tieftonbereich: Die Hörschwelle wird beim tiefsten Klavierton, dem Subkontra-A mit 27 Hertz, erst bei einem Schalldruckpegel von ca. 60 dB erreicht, was im Bereich um 1'000 Hz, dem der Schallintensität eines gesunden Mezzoforte-Tones entspricht.

Das Phon-Maß wurde im Labor an Sinustönen entwickelt und berücksichtigt nicht komplizierter strukturierte Schalle. Um daher Musik, Geräusche und störenden Lärm besser beurteilen zu können, wurde ein weiteres, globaleres Maß eingeführt, nämlich „Lautheit" oder „Sone". Lautheit bezeichnet also den subjektiv empfundenen Lautstärkepegel komplexer akustischer Signale. Dabei entspricht ein Sone per Definition 40 Phon. Es ist nun nicht so, dass 2 Sone 80 Phon entsprechen, denn ähnlich wie bei der Schalldruckpegelmessung ist der Anstieg logarithmisch, d. h. ein akustisches Signal wird bei einem Anstieg um jeweils 10 Phon als doppelt so laut wahrgenommen. 50 Phon entsprechen also einer Lautheit von 2 Sone, 60 Phon von 3 Sone etc.

Zusammenfassend sind die verwirrenden Bezeichnungen und Skalen Ausdruck des Bemühens, zwischen der objektiven Welt der Physik, die Lautstärke als Schalldruckpegel mit Geräten messen kann, und der subjektiven Wahrnehmung des Menschen, der Schall empfindet, zu unterscheiden. Die in psychophysiologischen Experimenten durchgeführten Schwellenbestimmungen vermögen zwar dann mit den Maßen Phon und Sone vergleichende Anhaltspunkte für das Lautheitsempfinden geben, aber hier spielen individuelle Unterschiede eine Rolle. So treten beispielsweise gelegentlich extrem niedrige subjektive Hörschwellen unter 4 Phon auf. Sie können durch anatomische Besonderheiten in der Struktur des Innenohres bedingt sein. Noch komplizierter wird es, wenn man bedenkt, dass auch gleiche Lautheit von Hörern unterschiedlich beurteilt werden kann, je nachdem ob der Schall als gut strukturiert und als angenehm oder als unstrukturiert und unangenehm empfunden wird. Hier wird auch deutlich, welche wichtige Rolle die Emotionen bei der Beurteilung von Lautheit spielen. Ein eingefleischter Heavy-Metal-Hörer wird Rockmusik subjektiv als weniger laut empfinden als der Renaissanceflöten-Fan.

Interessanterweise spiegelt sich das auch in objektiven Messungen der Gehörbelastung wider. Wahrscheinlich ist den meisten Lesern das Phänomen der vorübergehenden Hörschwellenverschiebung bekannt. Man verlässt einen lauten Ort, zum Beispiel eine Diskothek und hat den Eindruck, dass alles etwas gedämpft klingt. Eine derartige Schwellenverschiebung wird oft auch als Hörermüdung oder im Englischen als *temporary threshold shift* bezeichnet. Sie zeigt eine gefährdende Gehörbelastung an und ist durch eine verminderte Erregbarkeit der Sinneszellen im Innenohr und durch Anpassungsvorgänge in den Hörzentren des Zentralnervensystems bedingt. Die Stärke der Gefährdung spiegelt sich in der Dauer der Schwellenverschiebung wider. Die Arbeitswissenschaftler Strasser, Irle und Scholz aus Siegen[4] verglichen nun mit diesem Maß der Schwellenverschiebung die Gehörgefährdung durch Heavy-Metal-Musik und klassischer Musik im Vergleich zu Rauschen und Industrielärm. Dazu beglückten sie Versuchspersonen mit gesundem Gehör an vier Tagen jeweils eine Stunde lang entweder mit lautem Industrielärm, Heavy-Metal-Musik oder Musik von Vivaldi und Smetana. Die durchschnittliche Lautstärke entsprach 94 Dezibel. Nach dem Arbeitsschutzgesetz ist diese die erlaubte Lärmbelastung über maximal eine Stunde. Danach

2 Hans Hermann Wickel und Theo Hartogh: Musik und Hörschäden, Juventa Verlag Weinheim 2006

3 Bernhard Richter, Mark Zander, Claudia Spahn. Gehörschutz im Orchester. Freiburger Beiträge zur Musikermedizin. Projektverlag Bochum/Freiburg 2007

4 Helmut Strasser, Hartmut Irle und Roland Scholz, Physiologische Kosten energie-äquivalenter akustischer Belastungen durch „Weißes Rauschen", Industrielärm, Heavy Metal Musik und Klassische Musik. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. Nr. 59, Seite 395-407 2005

wurde die Dauer der Hörschwellenverschiebungen gemessen. Es zeigte sich, dass sehr laute klassische Musik „nur“ zu einer Schwellenverschiebung über 55 Minuten führte, Heavy-Metal-Musik und Industrielärm jedoch zu einer mehr als doppelt so langen Schwellenverschiebung von 127 bzw. 130 Minuten! Für dieses Ergebnis gibt es mehrere Erklärungen: Neben der Schallstruktur und der Schalldichte sowie der Intensität und Anzahl von eingestreuten starken Schallimpulsen – man denke an das Schlagzeug in der Heavy-Metal-Musik – spielt auch die emotionale Belastung durch die Musik eine Rolle. Stress kann zu einer Verengung der Arterien führen, was wiederum eine verschlechterte Sauerstoffversorgung von Sinneszellen im Innenohr und von Nervenzellen in den Hörzentren des Gehirns bedingen kann, woraus dann eine Verminderung der Reaktionsfähigkeit resultiert. Die Ergebnisse der Studie zeigen auch, dass kulturelle Einflüsse Hörbelastungen verursachen können. Auch diese Erscheinung hat einen Namen und wird als Soziakusis bezeichnet.

In ***Abbildung 1*** sind die Hörfelder des menschlichen Ohres für Sprache und für Musik und ihre Beziehung zum Schalldruck, zum Schalldruckpegel und zur Lautstärke in den unterschiedlichen Frequenzbereichen aufgetragen. Das Hörfeld für Sprache befindet sich in dem Bereich der besten Wahrnehmungsfähigkeit zwischen 250 und 4’000 Hz. Musik deckt einen sehr viel größeren Bereich des Hörfeldes ab. Der Verlauf der subjektiv bestimmten Hörschwelle entspricht der als 4 Phon-Grenze bezeichneten untersten Linie. Hier wird deutlich, dass der Bereich der subjektiv größten Empfindsamkeit bei etwa 4000 Hz liegt. Bei tiefen Tönen muss der Schalldruckpegel auf bis zu 60 dB ansteigen, damit der Ton überhaupt noch wahrgenommen werden kann.

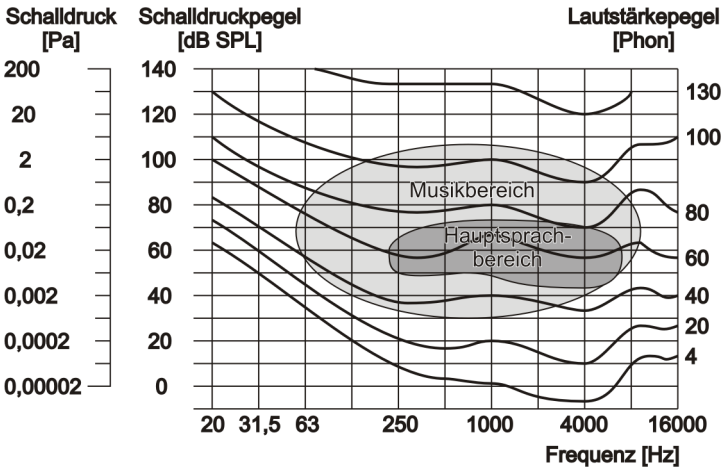

Abb. 1 Hörfelder des menschlichen Ohres für Sprache und für Musik.

Musik ist Klang

Ich zerlegte jeden einzelnen Ton in seine Bestandteile, um ihn wieder zusammenzusetzen, d. h. komponieren zu können. Vier Dimensionen machen ja erst in ihrem Zusammenwirken einen Ton aus: Tondauer, Tonhöhe, Tonstärke und Klangfarbe. Durch immer kompliziertere Anhäufungen, Gruppierungen von solchen isolierten Klangereignissen ist eine ganz neue Welt entstanden [5].

In der Natur tauchen in der Regel nicht Töne auf, sondern Geräusche, seltener auch Klänge. Unter einem Ton versteht man im physikalischen Sinn eine Sinusschwingung, die nur aus einer einzigen Frequenz besteht. Der physikalische Kammerton „a“ wäre eine Sinusschwingung mit 440 Hz. Eine Oboe, die diesen Kammerton im Orchester angibt, produziert keinen reinen Ton, sondern einen Klang. Klänge bestehen aus einem Grundton (z. B. aus dem Ton „a“ mit 440 Hz) und aus Obertönen. Bei vielen Musikinstrumenten, etwa der Geige, Flöte oder der Oboe, sind die Obertöne ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Die Obertöne des Kammerton „a“ der Oboe wären dann die Oktave mit 880 Hz, die darüber liegende Quinte mit 1320 Hz, die darüber liegende Quarte mit 1760 Hz, die darüber liegende große Terz mit 2200 Hz. usw. Das jeweilige Schwingungsverhältnis dieser Obertöne entspricht dann bei der Oktave 2:1, bei der Quinte mit 3:2, bei der Quarte 4:3, bei der großen Terz 5:4 usw. Auf diese Weise erhält man durch die Obertonreihe auch die in unserem Harmoniesystem üblichen Intervalle. Derartige Obertöne werden auch als „Harmonische“ bezeichnet. Es gibt aber auch Instrumente, bei denen die Obertöne nicht ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung sind. Dazu gehören beispielsweise das Xylophon und die Kirchenglocken. Hier spricht man dann besser von Teiltönen oder Partialtönen.

Im musikalischen Sinn können Klänge auch als Mehrklänge auftreten. So erzeugen beispielsweise die zwei auf dem Klavier nebeneinander angeschlagenen weißen Tasten „c“ und „d“ einen Mehrklang, der einer großen Sekunde entspricht und ein Schwingungsverhältnis von 9:8 besitzt. Entsprechend kompliziert sind dann auch die

5 Karlheinz Stockhausen über seine Komposition Kreuzspiel in: Ursula Stürzbecher „Werkstattgespräche mit Komponisten“, DTV, Seite 69 ff, 971

Schwingungsverhältnisse der jeweiligen Obertöne dieser beiden Grundfrequenzen. Interessant und vermutlich für die Entwicklung unserer Hörgewohnheiten von Bedeutung ist, dass auch die ersten Schallereignisse, die ein ungeborener Fötus im Uterus etwa ab der 22. Schwangerschaftswoche empfinden kann, Klänge sind. Herzschlag, Atemgeräusche und das Gluckern der Verdauungssäfte der Mutter enthalten

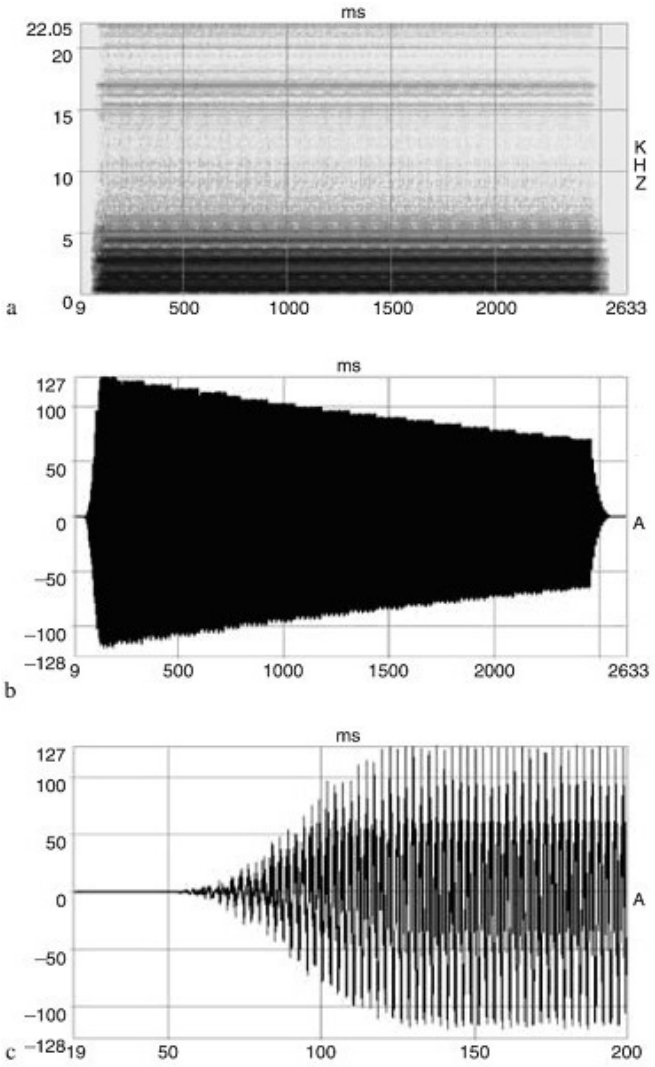

Abb. 2. Die akustischen Eigenschaften eines Geigentons (g`). In a is das Spektrum aufgezeichnet. Die x-Achse bezeichnet die Zeit von 2'633 Millisekunden (ms), die y-Achse die Frequenzen in Hertz (Hz). Die Grundfrequenz des Tones (392 Hz) und die ersten Obertöne sind durch die schwarzen Streifen im Bereich zwischen 500 Hz und 5 kHz dargestellt. Interessant ist, dass auch im Bereich über 10'000 Hertz (10 kHz) noch Klanganteile zu finden sind, die von vielen Erwachsenen nicht mehr gehört werden. In b sind die Schalldruckpegel des Tones, direkt am Klangkörper gemessen, aufgezeichnet. Hier wird deutlich, dass der Geigenton eine anhaltend hohe Intensität aufweist, weil die Saite durch den Bogen kontinuierlich zum Schwingen angeregt wird. In c ist auf der gedehnten Zeitachse, die jetzt nur noch 200 ms erfasst, die langsam zunehmende Energieentwicklung während des Tonbeginns dargestellt

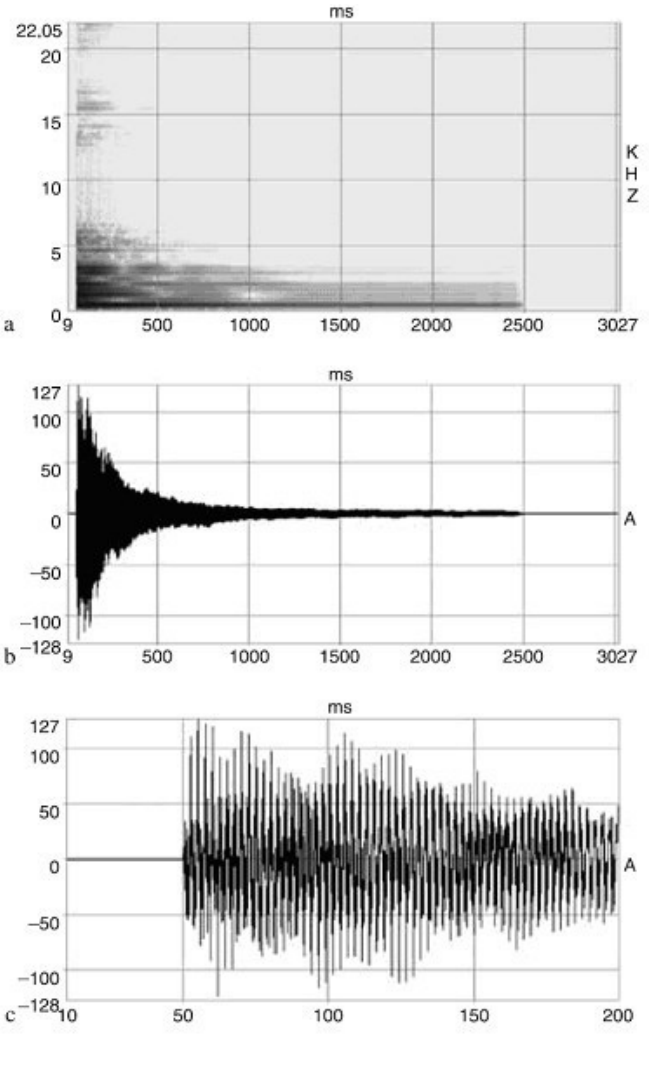

Abb. 3 Die akustischen Eigenschaften eines Klaviertones (g`). In a ist wieder das Spektrum aufgezeichnet. Die x-Achse bezeichnet die Zeit von 2'633 Millisekunden, die y-Achse die Frequenzen in Hertz. Im Gegensatz zum Geigenton führt der Klavierton nur zu Beginn zu einer Anregung auch im höheren Frequenzbereich. Auffallend ist, dass die hohen Frequenzen schnell abgedämpft werden. In b sind die Schalldruckpegel des Tones, direkt am Klangkörper gemessen, aufgezeichnet. Im Gegensatz zum Geigenton läßt der Schalldruck nach dem Anschlag mit dem Hammer sehr rasch nach. In c wird auf der gedehnten Zeitachse deutlich, dass sich beim Klavierton die Schallenergie sehr rasch entwickelt.

ganzzahlige Obertonreihen, die durch die Elastizität und das Schwingungsverhalten der Blutgefäße und der Darmwände bestimmt werden.

Die häufigsten Schallereignisse in der freien Natur sind Geräusche. Darunter versteht man Schallereignisse, bei denen zahlreiche Töne aus einem größeren Frequenzbereich überlagert sind. Sind alle Frequenzen mit gleicher Amplitude gleichzeitig vertreten, dann handelt es sich um technisches „weißes Rauschen". Rauschen wird auch in der Musik eingesetzt, allerdings nicht als weißes Rauschen, sondern als besondere Formen des „rosa Rauschens", das nur einen Teil des gesamten Frequenzbereichs enthält. Rasseln, Becken, und zahlreiche andere Schlaginstrumente erzeugen in unterschiedlichen Frequenzabmischungen rosa Rauschen.

Es gibt weitere Bezeichnungen die einen musikalischen Klang charakterisieren können. Dazu gehört vor allem der Begriff der Klangfarbe. Meist fällt es uns leicht, die Klangfarbe von verschiedenen Orchesterinstrumenten, etwa einer Geige und einer Trompete zu unterscheiden. Spielt man jedoch die Klänge dieser Instrumente rückwärts ab, so gelingt es uns oft nicht mehr, die Instrumente sicher zuzuordnen, es entsteht ein eigenartiger, an ein Akkordeon erinnernder Klang. Das liegt daran, dass die Klangfarbe nicht nur durch Grundton, die Summe der Obertöne und deren charakteristische Intensitätsverteilung bedingt ist, sondern zu einem großen Teil auch durch die Geräusche, die ganz zu Beginn des Tones, beim Einschwingvorgang eines Instruments entstehen. Diese Geräusche können bei rückwärts gespielten Tönen nicht mehr präzise erfasst werden. In den ***Abbildungen 2 und 3*** sind die Klangspektren, die Zeitverläufe und die Einschwingvorgänge eines Geigentons und des gleich hohen Klaviertons (eingestrichenes g´) dargestellt. Besonders die Einschwingvorgänge unterscheiden sich in beiden Instrumenten. Es wird deutlich, dass der Geigenton sich über eine Zeit von ca. 60 Millisekunden entfaltet, während der Klavierton gleich zu Beginn sehr rasch die volle Intensität aufweist. Dieser rasche Energiezuwachs entsteht durch den einem Schlagzeug ähnlichen Charakter des Klaviers, denn der Ton wird ja durch den Aufprall des Hammers auf eine Saite erzeugt.

Weniger bekannt ist eine weitere Eigenschaft musikalischer Klänge, die Tonfarbe oder „Tonigkeit", die manchmal auch „Chroma" genannt wird. Man versteht darunter eine Eigenschaft von Tönen, die unabhängig von der Oktavlage z.B. allen „a"-Tönen gemeinsam ist. So empfinden wir z.B. um Oktaven versetzte Töne oder Melodien als sehr viel ähnlicher als Töne und Melodien, die um Sexten oder Septimen versetzt sind. Auch Absoluthörer neigen häufig dazu, Töne im Oktavabstand wegen ihrer empfundenen Ähnlichkeit zu verwechseln. Und schließlich ist es sicher kein Zufall, dass die allermeisten Kulturen Tönen im Oktavabstand die gleichen Namen geben. Übrigens erkennen auch Rhesusaffen um Oktaven versetzte Kinderlieder wie z. B. „Happy Birthday" als gleich, eine Fähigkeit die als Oktaven-Generalisation bezeichnet wird. Allerdings scheitern die Affen bei Melodien die aus Zufallstönen bestanden oder bei einzelnen Tönen, das heißt, die Oktaven-Generalisation funktioniert nur für musikalische Gestalten[6]. Der Vorteil der Oktaven-Generalisation ist, dass für den Wahrnehmungsapparat der Hörbereich übersichtlicher gestaltet wird. Denn unser Gehirn muss sich nicht für jeden Ton des gesamten Hörbereiches einen eigenen Charakter und Namen merken, sondern nur für die innerhalb einer Oktave vorkommenden zwölf Töne.

Musik ist Gedächtniskunst

Doch bei einer etwas komplizierteren Musik, die man das erste Mal hört, hört man zunächst nichts. ..Was das erste Mal fehlt ist nicht das Verständnis, sondern das Gedächtnis. Dieses bildet sich nach und nach; und mit Werken, die man zwei oder dreimal gehört hat, geht es einem wie dem Schüler, der vor dem Einschlafen mehrmals eine Lektion durchgelesen hat, die er nicht zu können meinte und die er am nächsten Morgen auswendig hersagen kann.

Marcel Proust[7]

Musik entfaltet sich in der Zeit. Daher ist das Gedächtnis die wichtigste Voraussetzung um Musik zu verstehen. Die einzelnen Klänge werden erst durch das Gedächtnis zu kurzen Melodiebruchstücken in unserem Gehirn zusammengefügt. Aus ihnen werden dann durch den Gedächtnis-Kitt Themen, aus verschiedenen Themen werden dann die Sätze einer Sonate oder Symphonie aufgebaut und aus den Sätzen werden dann ganze Symphonien. Alle Musik spielt mit dem Gedächtnis.

Schon ein einfaches Kinderlied, etwa „Hänschen klein" lebt von der Wiederholung des ersten Motivs, das die erste Hälfte, den Vordersatz, des Eingangthemas bildet

6 A. Wright, J.J. Rivera, S. Hülse, M. Shyan, JJ. Neiworth:, Music perception and octave generalization in rhesus monkeys. Journal of Experimental Psychology 129: 2000: 291-307

7 Proust Marcel. Auf der Suche nach der verlorenen Zeit. Band 2 – Im Schatten junger Mädchenblüte, , Seite 149 Suhrkamp-Taschenbuch Verlag, Stuttgart (2004)

(***Abbildung 4***). Das Lied ist nach dem Liedschema zusammengefügt und besteht aus dem Thema A, das wiederholt wird, aus einem Mittelteil B, in dem ein neuer musikalischer Gedanke auftaucht und aus der Wiederholung des Themas A, das dann den Schluss bildet. Derartige einfache und daher eingängige Melodien sind auch für Kinder, die ja noch wenig Hörerfahrung besitzen, leicht zu erlernen. Unterstützt wird die Bildung des musikalischen Gedächtnisses durch die vielen Wiederholungen der Liedthemen. An „Hänschen klein" lässt sich eine der wichtigsten Funktionen des Gedächtnisses zeigen, nämlich Ordnungsbildung und Reduktion von Komplexität. Nur durch das Gedächtnis sind wir in der Lage, uns in dem Chaos der einströmenden Hörerfahrungen zu orientieren. Wahrscheinlich gründet sich die Beliebtheit der Kinderlieder auch darauf, dass Melodien und Themen wieder erkannt werden. Das Gehirn belohnt hier die Erfahrung der Ordnungsbildung mit positiven Emotionen, denn Erkennen von Ähnlichkeiten ist ein Weg zum Verstehen der Welt und eine wichtige Voraussetzung, um sich in ständig veränderten Lebensbedingungen zu Recht zu finden.

Abb. 4 An dem Kinderlied „Hänschen Klein" läßt sich die Rolle des musikalischen Gedächtnisses sehr gut darstellen. Das erste nur aus drei Tönen bestehende Motiv a) wird zunächst wiederholt, dann wird ein zweiter musikalischer Gedanke als Motiv b) eingeführt, der dann zusammen mit a) das Thema A bildet. Dieses Thema wird dann wiederholt, und prägt sich auf diese Weise sehr gut ein. Im Mittelteil B wird eine Variation des Motivs b) eingeführt und in zwei verschieden Tonhöhen (im Fachterminus als „Sequenz") gesunden. Zum Schluss wird das Thema A wiederholt.

Wir kommen hier zu einer weiteren möglichen Funktion der Musik: Musik hören und Musik machen trainiert auf spielerische Weise das Gedächtnis für akustische Informationen. Für die Menschen war es immer sehr wichtig, Klänge und Geräusche zu erkennen und richtig einzuordnen.

In der Musik wird auditives Gedächtnis immer gefordert und durch musikalische Erfahrung mit entwickelt. Variationen beispielsweise leben davon, dass man sich an die im Gedächtnis gespeicherte Originalversion erinnert und sich daran erfreut, welche neuen unvorhergesehenen Gestalten dieses Thema jeweils annimmt. Ob bayrische Volksmusik, Gamelan, Jazz, Pop oder Beethoven, die Freude an der Variation ist allen Musikarten gemeinsam. In Sonatensätzen der klassischen und romantischen Periode werden die Themen des ersten Teils, der „Exposition" in einer Durchführung variiert, und kehren dann in der „Reprise" meist in der gleichen Gestalt wie in der Exposition wieder. Und Zwölftonmusik besteht aus einer Serie von 12 unterschiedlichen Tönen, der Reihe, die ebenfalls ständig variiert wird und unterschiedliche Gestalt annimmt.

Natürlich können wir Musik genießen, ohne die Variationen zu erkennen, und ohne die Struktur des Sonatensatzes zu durchschauen. Aber es ist eben doch für viele Menschen eine zusätzliche Genugtuung, wenn in dem akustischen Chaos unser Gedächtnis für Orientierung sorgt. Beim ersten Hören geht es uns nämlich oft so, wie beim ersten Besuch einer unbekannten Großstadt ohne Stadtplan. Erst wenn wir bemerken, dass zwischen den Häuserzeilen immer wieder ein markantes Gebäude, beispielsweise ein Turm auftaucht, entsteht in uns das beruhigende Gefühl, dass wir nicht verloren sind und den Weg zum Bahnhof wieder finden würden. Diesen auf die Musik übertragenen Vorgang spricht Marcel Proust in dem Zitat oben an.

Wir kommen damit zu einer ganz grundsätzlich wichtigen Funktion des Gedächtnisses, nämlich der Ordnungsbildung. Das Erkennen von Strukturen beim Hören von Musik führt zu einer Reduktion von Unsicherheit – und genau dies scheint eine Quelle von Glücksgefühlen zu sein, die unsere Emotionen beim Musikhören mit bedingen.

Interessant sind die Vorgänge, die der musikalischen Gedächtnisbildung zu Grunde liegen. Schon vor der Geburt beginnt im Mutterleib das Gehirn des Föten, Klangfarben und Rhythmen und Melodien einzuspeichern. Allerdings sind die Eindrücke im Mutterleib noch recht flüchtig. Das Singen oder Cellospiel der Mutter wird der Säugling schon 14 Tage nach der Geburt nicht mehr erinnern – wenn er nicht

weiter musikalisch stimuliert wird. Das liegt daran, dass die Gedächtnisstrukturen des Gehirns im Säuglingsalter noch nicht ausgereift sind – übrigens auch der Grund, warum wir uns glücklicherweise nicht mehr an unsere eigene Geburt erinnern. In allen Kulturen wird dann eine ähnlichen Hörbiographie des Kindes erstellt: erst kommen Wiegenlieder, einfach strukturierte, gut zu singende, getragene Melodien, dann folgen Kinderlieder, deren Tonumfang schon größer ist und die durchaus auch ein höheres Tempo erreichen können. Kinder können unbewusst an Hand dieser Musik Regeln bilden, die Rhythmen, Tonhöhenverhältnisse und Harmonien betreffen. Während der Kindheit und Jugend gelingt es dann, zunehmend kompliziertere akustische Strukturen einzuspeichern, und beim Hören derartige Muster auch wieder zu erkennen. Das musikalische Gedächtnis formt sich so ständig durch die musikalische Erfahrung und ermöglicht eine zunehmend differenziertere Wahrnehmung. Dabei erzeugen die musikalischen Gestalten im Gedächtnis Schemata, die dann die Orientierung beim Hören unbekannter Musik erleichtern und das Wieder erkennen und Einordnen ermöglichen.

Die zunehmende Verfeinerung der Wahrnehmung und die Anhäufung von Gedächtnissen für musikalische Gestalten scheinen sich auch in den wechselnden Musikvorlieben während der Kindheit und Jugend widerzuspiegeln. Bei Kindern, die mit klassischer Musik aufwachsen, lässt sich nämlich beobachten, dass der Musikgeschmack die Musikgeschichte im Schnelldurchlauf wiederholt. Zehnjährige mögen eher Mozart und Barockmusik, vierzehnjährige entdecken ein Faible für Schumann und Brahms, und siebzehnjährige für Debussy und Ravel. So entstehen in der Jugend Vorlieben für zunehmend komplexere musikalische Strukturen. Wir kommen damit auch zu dem Problem der hyperkomplexen neuen Musik. Hier sind die musikalischen Gestalten so kompliziert, dass es für Laien sehr schwer ist, Schemata zu entwickeln. Eine Zwölfton-Melodie von Anton Webern wird schon im Original nur schwer im Gedächtnis behalten. Noch schwieriger ist es dann, Variationen dieser Melodien, etwa durch Veränderungen des Rhythmus zu erkennen. Vielleicht beruhigt es die Leser: auch Zwölfton-Spezialisten taten sich noch im Jahr 1990 sehr schwer, derartige Strukturen in einem Stück zu entdecken – allerdings steigt die Wiedererkennensrate bei häufigerem Hören der Musik – ein Hinweis darauf, dass auch solche ungewohnten und komplizierten Strukturen irgendwann als Schema im Gedächtnis verankert werden können[8]. Die Konsequenz ist eigentlich klar: Man müsste mehr neue Musik spielen, dann würde diese im Lauf der Zeit auch eine allgemeine Akzeptanz erhalten.

Die Mechanismen der musikalischen Gedächtnisbildung sind erst in den Grundzügen aufgeklärt. Wird eine Serie von Klängen nacheinander gespielt, werden sie zunächst im Ultrakurzzeitgedächtnis gespeichert. Das Ultrakurzzeitgedächtnis wird häufig auch als „echoisches“ oder auch als „sensorisches“ Gedächtnis bezeichnet und hält für wenige Sekunden das gerade Gehörte noch abrufbereit. Wir kennen den Effekt des echoischen Gedächtnisses aus Partysituationen. Man hört konzentriert einem Gesprächspartner zu und wird gleichzeitig von einem anderen Partygast nach etwas gefragt, ohne dass man auf den Inhalt dessen Frage achtet. Ist der Satz, den wir anhören wollten zu Ende, zaubern wir die Frage des Anderen aus dem Ultrakurzzeitgedächtnis, drehen uns zu ihm und beantworten die Frage – wenn wir höfliche Menschen sind. Das heißt, das kurzfristige Bereithalten der auditiven Muster im Ultrakurzzeitgedächtnis wird durch meine Entscheidung, die Aufmerksamkeit auf die Frage zu lenken dann in das Kurzzeitgedächtnis verlagert und steht für weitere Verarbeitungsschritte zur Verfügung.

Das Kurzzeitgedächtnis ist der Engpass unseres Gedächtnisses, denn es kann nur eine begrenzte Anzahl von Informationen abspeichern und auch nur über wenige Sekunden behalten. Allgemein spricht man von 7 bis 8 Gedächtnis-Items, die im Kurzzeitgedächtnis behalten werden. Eine typische Alltagsaufgabe für das Kurzzeitgedächtnis ist das Behalten einer Telefonnummer (mit Vorwahl) auf dem Weg vom Telefon zum Schreibtisch, auf dem der Notizblock mit dem Stift liegt. Die Behaltenszeit können wir verlängern, wenn wir uns die Nummer immer wieder vorsagen, etwa weil gerade kein Stift zur Hand war, als wir die Nummer notieren wollten. Dann kreist der Gedächtnisinhalt in einem Kreislauf zwischen Sprechen und Hören – dem so genannten „aural-oral-loop“. Ein derartiger „aural-oral-loop" wird übrigens auch verdächtigt, an der Entstehung von Ohrwürmern beteiligt zu sein.

Die Menge der im Kurzzeitgedächtnis abgelegten Informationseinheiten kann noch beträchtlich erhöht werden, wenn wir mit den Gedächtnisinhalten weiter arbeiten wollen, das heißt, aktiv die Aufmerksamkeit auf das Wahrgenommene lenken. Aus dem passiven Kurzzeitgedächtnis wird dann das aktive Arbeitsgedächtnis. Der Trick ist hier die sinnvolle Gruppierung von einzelnen Gedächtnisinhalten. Man nennt diesen Vorgang „Chunking“ von dem englischen Wort Chunk, das Brocken oder Klumpen heißt. Ein

8 Vgl.: Phillippe Lalitte und Emanuel Bigand, Lieben Sie Boulez? Gehirn und Geist 1-2, Seite 52-57, 2007

Musik entsteht im Kopf

Beispiel für „Chunking“: die Zahlen 33, 31, 55, 51, 64, 81, 91, 8, sind schwer zu behalten – wer allerdings im Geschichtsunterricht gut aufgepasst hat, der weiß, dass im Jahr 333 vor Christus die Schlacht von Issos statt gefunden hat, im Jahr 1555 der Augsburger Religionsfriede geschlossen wurde, im Jahr 1648 das Ende des dreißigjährigen Krieges in Münster besiegelt wurde und im Jahr 1918 der Versailler Friedensvertrag ausgehandelt wurde. Man muss sich dann nur noch merken: Issos, Augsburg, Münster, Versailles, und muss diese Geschichtsdaten als eine Zahlenreihe hintereinander aufschreiben und in Zweiergruppen unterteilen – und ist wieder bei einer leicht fasslichen Menge von Informationseinheiten angelangt. An diesem Beispiel wird auch deutlich, dass „Chunking“ auf Vorerfahrungen – in unserem Fall aus dem Geschichtsunterricht – aufbaut. Chunking findet auch in der Musik statt. So enthält beispielsweise unsere schon recht strapazierte Melodie „Hänschen Klein“ zweimal den Kuckucksruf – den wir unter anderem aus dem Lied „Kuckuck – Kuckuck ruft's aus dem Wald“ kennen. Und der zweite Teil des „Hänschen klein“- Themas ist nichts weiter als ein Dur-Tonleiter-Chunk, der in zahlreichen Kinderliedern auftaucht – etwa in „Alle meine Entchen“ oder in „Fuchs, Du hast die Gans gestohlen“. „Chunks“ und „Schemata“ haben vieles gemeinsam und werden gelegentlich auch gleichbedeutend benutzt. Allerdings ist Chunking eher eine Eigenschaft die automatisch stattfindet, während das Einordnen und Vergleichen von eingehenden Reizen mit den im Gehirn gespeicherten Schemata einen aktiven und anstrengenden Prozess voraussetzt.

Je mehr Erfahrungen wir mit den musikalischen Figuren, mit der jeweiligen Tonsprache haben, desto leichter wird uns das „Chunking“ fallen, denn wir können das Gehörte dann in schon Bekanntes („Kuckucksruf“, „Dur-Tonleiter“) einordnen. Die Fähigkeit, Musikausschnitte im Arbeitsgedächtnis zu speichern und von dort in das Langzeitgedächtnis zu übernehmen, wird somit durch das Hören von Musik geübt. Musik, die wir seltener hören, etwa balinesische Gamelanmusik oder serielle Musik von Luciano Berio) ist schwieriger zu „Chunken“ und bleibt daher nur schwer im Gedächtnis haften. Das musikalische Gedächtnis ist daher von Natur aus eher konservativ – ein Effekt, der sich auch in der psychologischen Bewertung niederschlägt: Uns gefällt das besser, was wir kennen[9].

Das musikalische Langzeitgedächtnis ist die Musikbibliothek im Kopf. Wie viele Stücke ein Mensch im Kopf hat, ist bislang nicht geklärt, aber bei Musikliebhabern werden es sicher viele Tausende sein. Oft genügen schon wenige Klänge eines Motivs, etwa ein „Ta-Ta-Ta-Taaaam“, um das Musikstück, im Beispiel Beethovens fünfte Symphonie, zu erkennen. Das Erkennen beschränkt sich dabei häufig nicht allein auf die Klänge, sondern es werden oft auch frühere Hörsituationen, die damals dabei empfundenen Emotionen, oft ein ganzes Lebensgefühl einer Lebensepoche mit aus dem Gedächtnis hervorgeholt. Man nennt diesen Effekt in der Musikpsychologie auch den „Play it again Sam“-Effekt – nach dem Film „Casablanca“, in dem ein bestimmter Song für eine glückliche vergangene Zeit und eine intensive Liebesbeziehung steht. Derartige starke emotionale Färbungen vieler Musikstücke sind sicher daran beteiligt, dass das Langzeitgedächtnis für Musik sehr stabil ist, denn wir wissen, dass Emotionen für die Gedächtnisbildung von größter Bedeutung sind. Melodien werden häufig selbst von Menschen mit weit fortgeschrittener Alzheimerdemenz noch erinnert, während andere Gedächtnisinhalte, Worte, Namen von Angehörigen, Alltagsfertigkeiten schon längst verblasst sind. In dem eindrucksvollen Film „2001 - Odyssee im Weltraum“ hat der Regisseur Stanley Kubrik diesem Phänomen ein ironisches Denkmal gesetzt. Als der letzte im Raumschiff überlebende Astronaut dem mordenden Bordcomputer HAL das Gedächtnis durch schrittweises Abschalten der Module löscht ist das letzte Signal des Computers ein verzerrtes „Hänschen klein“.

Eckart Altenmüller

9 Diese Gesetzmäßigkeit hat der deutsche Psychologe Wilhelm Wundt in der sogenannten „Wundt-Kurve“ ausgedrückt. Wenn wir einen zunächst neutral bewerteten Reiz mehrfach wahrnehmen, steigert sich unser Gefallen daran. Ab einer bestimmten Expositionshäufigkeit wird er dann langweilig und unsere Vorliebe für diesen Stimulus sinkt. Vgl: Daniel Berlyne, 1971, Aesthetics and Psychobiology, Appleton-Century-Crofts (New York)

Prof. Dr. med. Eckart Altenmüller

ist Direktor des Instituts für Musikphysiologie und Musiker-Medizin an der Hochschule für Musik, Theater und Medien in Hannover. Er ist ausgebildet als Neurologe und Flötist und befasst sich mit den hirnphysiologischen Grundlagen des Musizierens und der Musikwahrnehmung.