

DIE KLANGWELT ALS FILTERKETTE

VON GOLO FÖLLMER

I. EINLEITUNG

Der Begriff der Filterung ist in der Klangbearbeitung vermutlich (dies bleibt historisch zu überprüfen) seit Beginn der analogen elektronischen Audiosignalverarbeitung gebräuchlich¹. Aus der Disziplin des Toningenieurwesens kommend, bezeichnet er eine Beeinflussung der relativen Signalpegel verschiedener Spektral- bzw. Frequenzanteile eines gegebenen Klanges. An jeder Stereoanlage kann man einen solchen Eingriff mittels der Drehknöpfe für ›Bass‹ und ›Höhen‹ vornehmen, und in der Studio- und DJ-Technik ist das Prinzip grundsätzlich identisch, nur ist die Regelung hier erheblich flexibler. Zweck einer Filterung ist entweder die nachträgliche Korrektur eines irgendwie nicht ›richtig‹ aufgezeichneten Klangs oder die kreative klangfarbliche Verfremdung eines wie auch immer gearteten Ausgangssignals, sei dies live zur Übertragung z.B. via Rundfunk oder zur Speicherung auf CD o.ä.

Während der Begriff der Filterung eigentlich aus dieser ›nachträglichen‹ Veränderung eines Klanges kommt, also die Modifikation einer elektronischen oder digitalen Repräsentation eines akustischen Ereignisses bezeichnet, stelle ich die Frage, welche Erkenntnisse daraus zu ziehen sind, wenn man ihn auf akustische und psychoakustische Vorgänge überträgt. Das liegt auch deswegen nahe, weil viele Anwendungen elektronischer Filterung akustische und psychoakustische Spektralveränderungen letztlich ersetzen, ergänzen oder ihnen entgegenwirken sollen und dies in den meisten Fällen auch mit großer Übereinstimmung der Ergebnisse erfolgt.

Der vorliegende Artikel beschränkt sich dabei auf das audioteknische Verständnis von ›Filterung‹, auch wenn entsprechend dem weiteren Begriffsverständnis anderer Disziplinen z.B. Unterscheidungs- und Auswahlprozesse etwa in Bezug auf Musiktitel aus einem Streaming-Dienst wie *spotify* ebenfalls unter dem Begriff geführt werden könnten. Ich widme mich daher zuerst technischen Prinzipien und Wirkungen elektronischer und digitaler Audiofilter. Daraufhin soll erörtert werden, inwiefern in akustischen Vorgängen, d.h. in der Erzeugung und Ausbreitung von Luft- und Körperschall sowie in der Hörwahrnehmung, also in Vorgängen außerhalb elektronischer Medien, Filtereffekte auftreten. Dazu werden Prinzipien der Schallerzeugung, der Schallübertragung in Luft und in gebauter Architektur sowie der Schallverarbeitung und -wahrnehmung im auditiven Wahrnehmungsapparat diskutiert. Schließlich werden zwei ausgewählte künstlerische Filteranwendungen diskutiert.

¹ Alternativ wurde u.a. der dem Filter nahe Begriff des ›Siebs‹ verwendet, etwa für das sog. ›Oktavsieb‹ oder ›Terzsieb‹.

2. ELEKTRONISCHE UND DIGITALE AUDIOFILTER

2.1 DAS FREQUENZSPEKTRUM

Elektronische Filter verändern die Spektralanteile einer als Spannungsverlauf vorliegenden Repräsentation (siehe 3.3) eines Schallsignals. Sie verstärken oder dämpfen also z.B. hohe oder tiefe Frequenzanteile eines Klangs. Die Frequenzspektren selbst entstehen bei tonalen Klängen, also solchen, die wir als einen Klang mit einer Tonhöhe (er singt ein a') wahrnehmen, aufgrund von Interferenzen im Schwingungssystem der Klangquelle. Wie Pythagoras gezeigt hat², bilden sich in tonalen Schwingungssystemen wie einer gespannten Klavier- oder Gitarrensaite, einer Orgelpfeife oder einer Trompete nur solche Schwingungen aus, die strikt der sog. harmonischen Reihe entsprechen, d.h. sie sind ganzzahlige Vielfache der von der Schwingungslänge exakt auf die Länge der Saite passenden Grundschwingung. Diese Obertonstruktur bildet sich in allen tonalen Schwingungssystemen (alle Orchesterinstrumente mit Ausnahme einiger Instrumente des Schlagwerks, menschliche und viele tierische Stimmen, etwa Vogelgesang etc.) mit exakt denselben Frequenzverhältnissen aus. Obertonfrei sind allein die nur technisch erzeugbaren Sinustöne, die tatsächlich (im technischen Idealfall) aus nur einer Frequenz bestehen. Geräuschhafte Klänge beruhen auf einer diffusen Frequenzmischung ohne harmonische Verhältnisse, besitzen aber ebenso immer eine gewisse spektrale Breite, also eine Anzahl im Frequenzband verteilter Schwingungen. Das bedeutet: Jeder ›Ton‹ und jedes Geräusch besteht aus vielen verschiedenen Frequenzen, und je nachdem, wie stark seine einzelnen Frequenzen ausgeprägt sind, ergibt sich beim Hören ein anderer Klangeindruck. Was Filter tun, ist, dass sie auf die relative Stärke der verschiedenen Frequenzbereiche einwirken und so den Klangeindruck modifizieren.

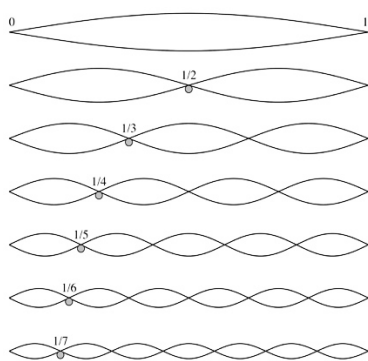


Abb. 1: Veranschaulichung von Schwingungen, die sich auf einer Saite ausbilden, hier bis zum siebten Teilton dargestellt. Die sieben (und weitere!) Schwingungen muss man sich überlagert auf eine Saite schwingend vorstellen. Quelle: Herbertweidner in der Wikipedia auf Deutsch, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20373962>, eingesehen am 17.07.2020.

² Pierce: Klang. Musik mit den Ohren der Physik, S. 21.

2.2 FILTERTYPEN

Der Wirkungsbereich elektronischer Filter kann relativ frei gewählt werden, u.a. ob ein breites oder ein schmales Stück des Frequenzbandes beeinflusst werden soll. Dabei sind zwei Aspekte zu beachten: Erstens wirkt ein Filter immer auf alle Klänge in einem Signal. Habe ich eine Klarinette und einen Sänger zusammen (also z.B. auf einer Spur eine Audiorekorders) aufgenommen, kann ich nicht bestimmte Anteile der Klarinette (heraus)-filtern, ohne dieselben Frequenzanteile des Sängers zu beeinflussen. Zweitens besitzen Filter aus technischen Gründen (auch als digitale Filter) immer Übergangsbereiche, in denen der Filter noch nicht voll wirkt. Man kann niemals die Frequenz 1000 Hz aus einem Signal auslöschen und gleichzeitig 1001 Hz unberührt lassen.

Elektrotechnisch werden Filter mittels Verschaltung von Widerständen und Kondensatoren (RC-Schaltung) realisiert. Aktive Filter, also solche, die einen Frequenzbereich verstärken (und nicht nur absenken) können, werden mit Hilfe von Transistoren (früher Röhren) als Operationsverstärker mit frequenzabhängiger Gegenkopplung aufgebaut, d.h. das Signal wird auf sich selbst zurückgekoppelt, quasi als kontrolliertes Feedback.³ Digitale Filter werden durch Kombinationen aus Gewichtungen, Summationen und Verzögerungen digitaler Abtastwerte in komplexen Algorithmen konstruiert.⁴ Da ihre Prinzipien den elektronischen weitgehend gleichen, gehe ich aus Platzgründen nicht weiter auf sie ein.

Mit welchem Maß verschiedene Frequenzen durch einen Filter gedämpft oder verstärkt werden, zeigt die sog. Übertragungsfunktion, die der Filter bei einer spezifischen Einstellung besitzt (siehe Abb. 2ff.). Die Kurve zeigt auf der X-Achse die Frequenzen und auf der Y-Achse das Verstärkungs- bzw. Dämpfungsmaß. Befindet sich die Kurve bei einer Frequenz auf der Nulllinie, bleibt diese Frequenz unbeeinflusst (verlässt den Filter gleich stark/laut, wie sie hinein ging). Zeigt die Kurve einen negativen Wert, wird diese Frequenz abgeschwächt, bei positivem Wert verstärkt. Die hier üblicherweise verwendete Einheit Dezibel (dB) wurde für Schall gewählt, weil das menschliche auditive System logarithmisch hört, und zwar sowohl auf der Frequenzskala als auch auf der Lautheitsskala. Eine Verstärkung um 10 dB entspricht im Haupthörbereich von 1 kHz etwa dem doppelten Lautheitseindruck, während es energetisch dem zehnfachen Schalldruck entspricht. Die wichtigsten Arten elektronischer und digitaler Filter sind Hoch-/Tiefpass und Bandpass.

3 Maempel u.a.: »Audiobearbeitung«, S. 744.

4 Zölzer: »Signalverarbeitung, Filter und Effekte«, S. 816.

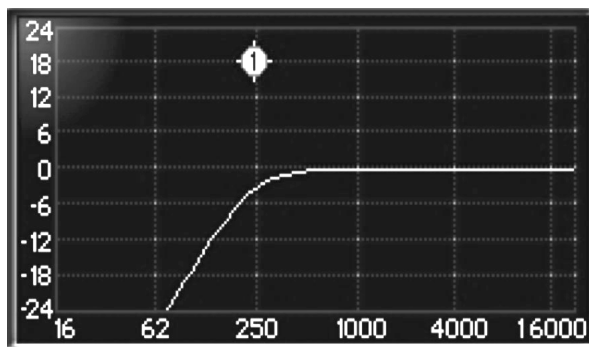


Abb. 2: Hochpassfilter des Plugin-Herstellers Waves. Quelle: der Autor

Der Hochpassfilter (Abb. 2) dämpft ab einer einstellbaren Grenzfrequenz (im Beispiel des hier dargestellten Waves-Filters markiert durch die Zahl 1, im Bsp. also 250 Hz) Frequenzanteile unterhalb dieser Grenze ab. Die weiße Kurve zeigt den Dämpfungswert für die jeweilige Frequenz, hier 0 dB (also keine Beeinflussung) oberhalb ca. 500 Hz, -3dB bei 250 Hz und mehr als -24 dB bei 62 Hz.

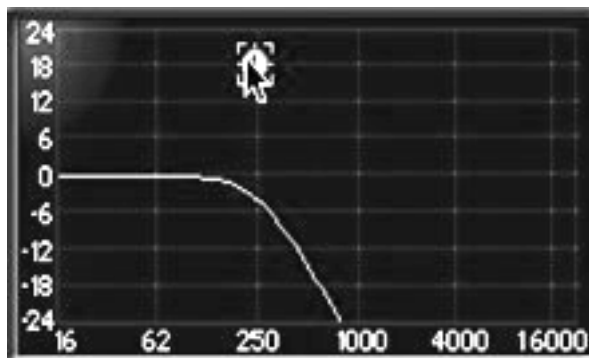


Abb. 3: Tiefpassfilter. Quelle: der Autor

Der Tiefpassfilter (Abb. 3) arbeitet genau umgekehrt: Er dämpft ab der eingestellten Grenzfrequenz (hier wieder 250 Hz) Frequenzanteile oberhalb dieser Grenze ab.

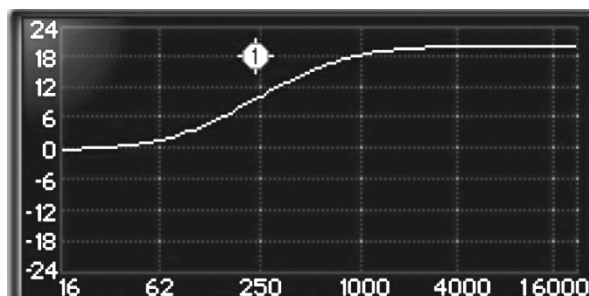


Abb. 4: Shelf-Filter. Quelle: der Autor

Shelf-Filter (Abb. 4) belassen einen Bereich unverändert (beim High-Shelf die tiefen Frequenzen, hier unterhalb etwa 100 Hz, beim Low-Shelf die hohen) und bieten die Möglichkeit, den zu verändernden Bereich (das Shelf; dt. etwa: Sockel, Plateau)

über den Parameter ›Gain‹ entweder zu dämpfen oder zu verstärken. Der Nachteil dieses Filters ist die geringere sog. ›Flankensteilheit‹ oder ›Güte‹: Während der Tiefpassfilter von 250 bis 1000 Hz eine Absenkung um ca. 24 dB erreicht, schafft der Shelf-Filter bauartbedingt in dieser Frequenzspanne nur etwa 10 dB. Die verschiedenen Filtertypen weisen also durch Grenzen ihrer Einstellmöglichkeiten und Filterkurven Vor- und Nachteile auf.

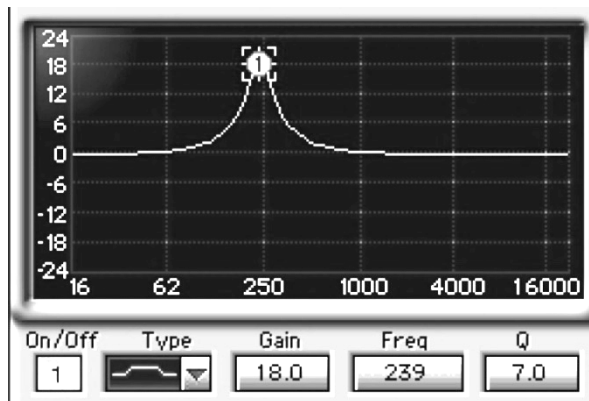


Abb. 5: Bandpassfilter. Quelle: der Autor

Der Bandpassfilter (Abb. 5) teilt das Frequenzspektrum nicht nur in zwei, sondern in drei Teile. Er lässt einen oberen und einen unteren Bereich unberührt und verändert ein in seiner Breite definierbares mittleres Frequenzband.

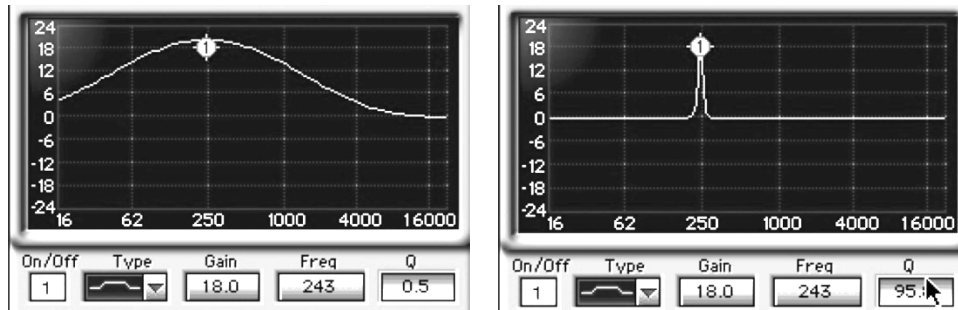


Abb. 6 & 7: Bandpassfilter mit extrem großer (links) und extrem kleiner (rechts) Bandbreite, eingestellt durch den Parameter ›Q‹. Quelle: der Autor

Die Breite dieses Bandes stellt man über einen dritten Parameter neben ›Gain‹ und ›Freq‹ (Grenz-/Mittenfrequenz) ein, den man bei diesem Filtertyp zusätzlich zur Verfügung hat: Die Güte/Flankensteilheit und damit die Bandbreite dieses Filters kann mit dem Parameter ›Q‹ definiert werden. Im linken Beispiel ist Q auf den Wert 0,5 eingestellt, wodurch das gefilterte Band extrem breit wird, nämlich nahezu das gesamte hörbare Spektrum umfasst. Im rechten Beispiel dagegen ist fast der Maximalwert des hier verwendeten Filters des Herstellers Waves gewählt: Bei $Q = 95$ (max. ist 100) ist der Band-Shelf-Filter nur wenige Hertz breit.

2.3 ANWENDUNGSSZENARIEN VON FILTERN

Ein Anwendungsbereich von Filtern ist die Reduktion von Störfrequenzen. Der gerade erläuterte schmalbandige ›Notch-Filter‹ wird z.B. zur Dämpfung von Netzbrummen verwendet während Hochpassfilter gegen störenden Trittschall eingesetzt werden. Die häufigste Anwendung erfolgt aber, um Klangfarben eine Ausgewogenheit zu verleihen, die man im vorhandenen Signal aus irgendeinem Grund vermisst.

Nach etablierter Audio-Terminologie dienen Filter der klangfarblichen Kontrolle von Audiosignalen durch Veränderung des Frequenzspektrums von Signalen. Für die klangfarbliche Wirkung ist dabei v.a. der Amplitudengang von Bedeutung, der Phasengang hingegen ist in bestimmten Grenzen vernachlässigbar.⁵

Der Begriff ›Amplitudengang‹ bezeichnet, identisch zum o.g. Begriff Übertragungsfunktion, die relative Stärke/Lautheit einzelner Frequenzbereiche im Verhältnis zueinander.⁶ Das Bedürfnis zu Filtern setzt also voraus, dass aus irgendeinem Grund ein aufgezeichnetes oder live zu übertragendes Schallsignal unausgewogen erscheint. Dieser Eindruck eines Defizits kann sich nur im Vergleich zu einer Idealvorstellung einstellen, etwa dem Eindruck, dass eine Sprecherstimme beispielsweise für ein Hörspiel ›zu dünn‹ oder ›zu wummerig‹ erscheint. Dass solch ein Eindruck von ›zu wenig‹ oder ›zu viel‹ von vielen Faktoren abhängt, leuchtet unmittelbar ein, wenn man z.B. deutsche Hörspiele aus verschiedenen Dekaden vergleicht. Die jeweiligen Klangfarben der Sprecherstimmen unterscheiden sich so charakteristisch, dass man Stimmklangideale deutscher Hörspiele der 1950er, 1980er und 2000er Jahre oder etwa deutscher Radiosprecher*innen im Vergleich zu ihren amerikanischen Kollegen*innen leicht unterscheiden kann. In der Radiopraxis geht das so weit, dass Sprecherstimmen durch individuelle Filterung an den Klangstil ihres Senders angepasst werden, die dann bei jedem Einsatz mittels ihres sog. ›Stimmschlüssels‹ (gespeicherte Filtervoreinstellung) abgerufen wird.⁷

Derart differenzierte Klangideale gibt es für jegliche stimmlichen und instrumentalen Klangquellen in den verschiedensten medialen Anwendungen und musikalischen Stilen. Sprechende Belege dafür sind z.B. Handbücher der Tonstudiotechnik⁸ und unzählige Anleitungen für die Abmischung von Instrumenten und Stimme auf Youtube, in Musikerforen etc. Gründe für die Herausbildung dieser Ideale liegen

5 Maempel u.a.: »Audiobearbeitung«, S. 744.

6 Entsprechend dem Hinweis von Maempel ignoriere ich in diesem Artikel den sogenannten Phasengang, da er nur bedingt relevant, seine Behandlung aber kompliziert ist. Abweichungen von einem linearen Phasengang treten u.a. als schwer kontrollierbare Artefakte elektronischer Filter auf.

7 Föllmer: »Theoretisch-methodische Annäherungen an die Ästhetik des Radios«, S. 323.

8 Katz: Mastering Audio.

z.B. in einem gewünschten Auftreten eines Radiosprechers, etwa als Autorität, als vertrauens- oder liebenswürdig. Solche Eindrücke hängen von vielen Faktoren ab, und der Frequenzverlauf der Stimme spielt dabei eine wesentliche Rolle. Wie wir weiter unten sehen werden, können solche Eindrücke gezielt über Filterwirkungen im menschlichen Vokaltrakt erreicht werden. Sie können aber auch an anderen Stellen der Signalkette erzeugt oder zumindest unterstützt werden, etwa durch bestimmte Mikrofonverwendungen, also durch Wahl und speziellen Einsatz des Schallwandlers.

Ein weiterer häufiger Anwendungsfall elektronischer und digitaler Filter ist die gezielte Imitation einer spezifischen Unausgewogenheit, die auf bestimmte Artefakte hinweist und damit entweder spezielle Kontextinformationen oder ungewöhnliche ästhetische Ideale aktiviert. Das im Film- und Hörspielton womöglich am häufigsten eingesetzte derartige Artefakt ist der Telefonfilter. Aufgrund verschiedener technischer Erwägungen ist das Spektrum des Telefons auf Frequenzen zwischen 300 und 3400 Hz beschränkt. Wird nun z.B. in einem Film diese Klangwirkung benötigt, nimmt man den Sprecher nicht über Telefon auf, sondern filtert das Signal mit steiflankigen Hoch- und Tiefpässen mit Grenzfrequenzen von 300 und 3400 Hz.

Auch der Eindruck von Raum, also einer räumlichen Ausbreitung der Schallquellen kann durch Filter beeinflusst bzw. partiell künstlich erzeugt werden. So entwickelte der Dirigent und als Experimentator mit tonstudiotechnischen Anordnungen aktive Hermann Scherchen ein Verfahren, das den im Jahr 1960 noch größtenteils monophonen Musikmedien Rundfunk und Schallplatte eine quasiräumliche Wirkung geben konnte.

Eine vor Einführung der Stereophonie von Scherchen gemachte Erfindung war der sogenannte Sterophonier, mit dem monophone Schallsignale so verarbeitet wurden, daß eine räumliche Illusion bei der Wiedergabe entstand. Denn trotz hoher Wiedergabetreue der UKW-Übertragung und großer Lautsprecher entstand immer der Eindruck, daß der Schall aus einem Loch in der Wand kam. Der Sterophonier beruhte auf der einfachen Tatsache, daß die Geigen auf dem Podium immer links und die Bläser immer rechts plaziert werden. Durch die Verteilung des Signals auf zwei Signalwege, bei dem in dem einen die Höhen und dem anderen die Tiefen stärker angehoben werden, gelang es, bei der Wiedergabe mit zwei Lautsprechern eine verblüffende räumliche Wirkung zu erzielen.⁹

9 Krause: Das Gravesaner Studio und seine Ausstrahlung, S. 117-118.

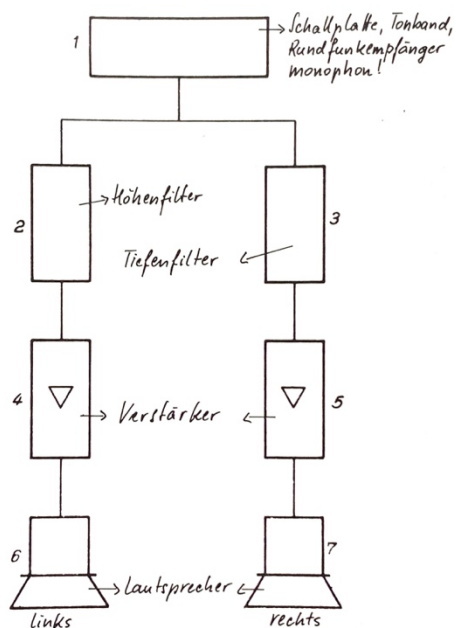


Abb. 8: Prinzipschaltbild des Stereophoners. Beilage zur amerikanischen Patenturkunde vom 17. Mai 1960, Quelle: Krause: Das Gravesaner Studio und seine Ausstrahlung, S. 119.

Ähnliche Werkzeuge zur Erzeugung von ›Pseudostereophonie‹ werden auch heute noch zur Imitation oder Verbesserung des Raumeindrucks verwendet. Der ›Ozone Imager‹ des Plugin-Herstellers iZotope kann monophonen Aufnahmen räumliche Breite geben und arbeitet dafür mutmaßlich auch mit Filtern, zusätzlich aber auch mit Signalverzögerungen im Millisekundenbereich und damit Phasenverschiebungen von Signalanteilen.

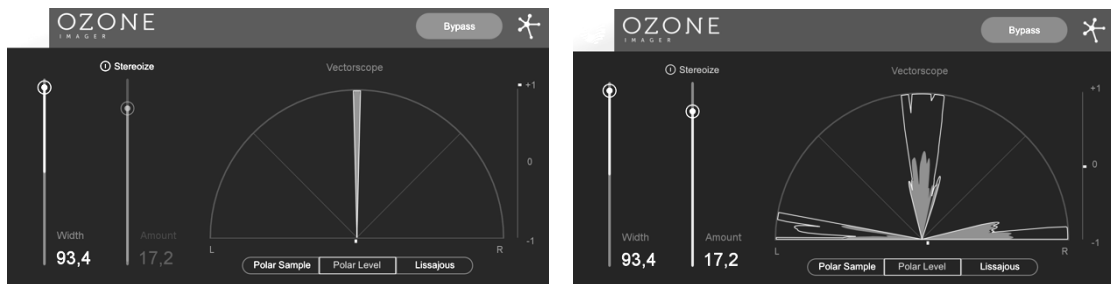


Abb. 9 & 10: Polardiagramm-Darstellung der Schallenergie beim Ozone Imager; links das monophone Originalsignal (Funktion ›Stereoize‹ abgeschaltet) und rechts ein pseudostereophones Signal mit aktivierter ›Stereoize‹-Funktion. Quelle: der Autor.

Schließlich spielen kreative technische Anwendungen von Filtern eine große Rolle, u.a. in der elektronischen Klangsintese, insbesondere in der sog. subtraktiven Synthese, die darauf beruht, aus einem breitbandigen Ausgangsklang durch gezielte Filterung spezielle Klangcharakteristika zu extrahieren. Ein zentraler Baustein von Robert Moogs Serie von Moog Synthesizern ist der ›Ladder Filter‹, der seinen

Namen von vier paarweise (im Schaltbild leiterförmig) angeordneten Transistoren erhielt. Dieser Filter besitzt eine ungewöhnlich große Flankensteilheit, produziert aufgrund dessen aber im Bereich seiner Grenzfrequenz deutlich hörbare Verzerrungen. Nach dem von Moog eingeführten Prinzip der Spannungssteuerung aller Synthesizermodule kann auch der Ladder Filter manuell oder durch einen tieffrequenten Oszillator periodisch variiert werden. Die Kombination aus Spannungssteuerung, extrem steiler Filterung und charakteristischen Verzerrungen werden als ›signature sound‹ der Moog Synthesizer angesehen.¹⁰

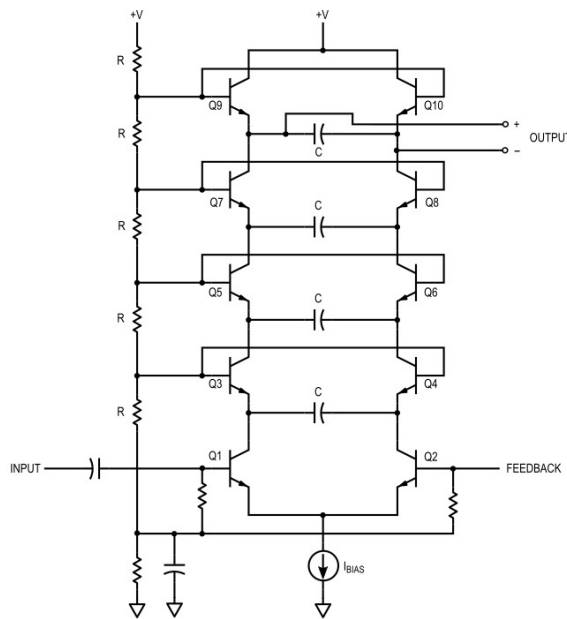


Abb. 11: Schaltbild des Ladder Filters. Quelle: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analyzing-the-moog-filter/> (eingesehen am 19.7.2020)

3. DIE AKUSTISCHE REALITÄT ALS FILTER-KETTE

Die im vorhergehenden Teil genannten Bezüge zwischen elektronischen Filtern und akustischen Vorgängen weisen auf einen wesentlichen Umstand der Erzeugung, Übertragung und Wahrnehmung von Klang hin: Alle Stadien akustischer bzw. auditiver Vorgänge sind selbst durch eine jeweils spezifische Übertragungsfunktion, also eine Filterwirkung charakterisiert. Im Folgenden erörtere ich exemplarisch die Filterwirkung einiger dieser Stadien innerhalb einer Kette aufeinanderfolgender Schwingungs- und eben immer auch Filterprozesse.

¹⁰ Pinch/Trocco: Analog Days. The Invention and Impact of the Moog Synthesizer, S. 64-66.

3.1 SCHALLERZEUGUNG DURCH INSTRUMENTE UND DIE MENSCHLICHE STIMME

Die individuellen Klangspektren von Instrumenten und Stimmen sind durch drei jeweils eigenständige Teilsysteme charakterisiert: a) ein Anregungssystem für die Schwingungen, b) ein Resonanzsystem und c) ein spezifisches Abstrahlverhalten des betreffenden Körpers. Beim Klavier etwa erfolgt die Anregung durch den Schlagimpuls eines mit Filz bespannten Hammers. Die Verweildauer des Hammers auf der Saite während des Anschlagimpulses bestimmt dabei die Filterwirkung der Anregung: Bei Basssaiten ist die Verweildauer deutlich kürzer als eine Periode der Grundschiwingung, wohingegen sie im Diskant eine ganze Grundschiwingung oder länger beträgt. Während der Hammer also noch an der Saite anliegt, schwingt diese im Diskant schon zurück und wird durch den Filz sofort wieder abgedämpft. Im Bass aber ist der Hammer längst weg, wenn auch höhere Teiltöne zurückschwingen. Ergo bilden die Basssaiten des Klaviers viele Obertöne aus, während Diskantsaiten verhältnismäßig matt klingen.¹¹

Auch das Resonanzsystem des Klaviers dämpft höhere Frequenzen ab, und zwar durch die Steifigkeit der relativ dicken Stahlsaiten (etwa im Vergleich zu den viel dünneren Stahlsaiten des Cembalos, das erheblich obertonreicher klingt¹²), die das Instrument zur Erhöhung der Lautstärke benötigt, nämlich um größere Räume zu füllen und sich als Soloinstrument neben dem Orchester durchzusetzen. Hohe Frequenzen besitzen nämlich eine geringere Energie und erfordern mit ihren vielen Wellenbäuchen größere Biegewinkel als tiefe Frequenzen, die sie dem Material nur mit Verlusten abringen können. Schließlich ist auch das Abstrahlsystem des Resonanzbodens im Klavier auf den Frequenzbereich von 200-1.000 Hz fokussiert. Höhere wie auch tiefere Frequenzen werden mit 12-15 dB/Oktave bedämpft.¹³

Aus diesem Grund haben Klavierhersteller ausgeklügelte Resonanzsysteme entwickelt, die dieser Mattheit entgegenwirken sollen, u.a. Blüthner das ›Aliquot‹-System mit Resonanzsaiten, die eine Oktave höher gestimmt sind. Steinway verwendet u.a. die sog. Steinway-Glocke, eine schwere Metallglocke, die Schwingungen im Diskantbereich auf das Gehäuse übertragen und so deren Abstrahlung verstärken soll.

Auch dem kulturell geprägten Harmonieempfinden der Hörer*innen wird durch einen physikalischen Filterkniff Rechnung getragen. Indem der Anschlagpunkt der Hämmer auf 1/7 der Saitenlänge gelegt wird, bildet sich der siebte Teilton in der Saitenresonanz schwächer aus, denn hier hat dieser Teilton einen Schwingungsknoten (s. Abb. 1). Dies ist erwünscht, weil dessen Frequenz unbequem zwischen den Halbtonschritten (relativ zum Grundton zwischen der großen und kleinen

¹¹ Meyer: »Musikalische Akustik«, S. 127.

¹² Dazu trägt auch der Anzupfmechanismus des Cembalos bei, der das oben genannte Hammerdämpfungsproblem umgeht.

¹³ A.a.O., S. 137.

Septime) der gleichschwebend temperierten europäischen Tonskala liegt und dadurch in bestimmten Tonpaarungen den Eindruck von Rauigkeit erweckt.

Bei der Abstrahlung spielt auch die Raumrichtung eine wichtige Rolle, da bei den meisten Instrumenten besonders die hohen Frequenzen stark richtungsabhängig in den Raum übertragen werden. Beim Schalltrichter der Trompete beispielsweise sacken Frequenzen oberhalb von 3.000 Hz schon bei einer Richtungsabweichung von 35° um 10dB ab, sind also nur noch halb so laut wie in der Hauptrichtung, während die tiefsten Töne des Instruments bis ca. 500 Hz in alle Richtungen gleich laut abgestrahlt werden. Eine Trompete klingt daher von der Seite gehört erheblich matter als frontal. Die räumliche Ausrichtung von Instrumenten und Stimmen bewirkt also eine teils hoch effiziente Filterung.¹⁴

Noch stärker kann diese Filterung durch spezielle Dämpfer erzeugt und manuell differenziert geregelt werden. Bei der Posaune verwendet man dafür traditionell die Gummiglocke eines Klopömpels und erzielt durch zum Spiel synchronisiertes Öffnen und Schließen einen zeitlich veränderlichen Filtereffekt, der später für E-Gitarren in Form des elektronischen *Wah-Wahs* auf den Markt kam.

Das wichtigste Filterprinzip der menschlichen Stimme ist die Formantbildung im Artikulationsapparat. Beim Sprechen erzeugt man durch Verformung des Mundraums, der Mundöffnung und der Zunge Resonanzräume, die in dem durch die Stimm lippen angeregten Frequenzspektrum charakteristische Verstärkungsbereiche hervorrufen. Je nach Lage insbesondere der ersten drei »Formanten« resultieren daraus die Vokale der menschlichen Sprache. Sprechen beruht also auf komplexen, sich ablösenden Filterprozessen des Mundes. »The resulting sound coming from the lips is modified by the vocal tract transfer function, often called the vocal tract filter.«¹⁵

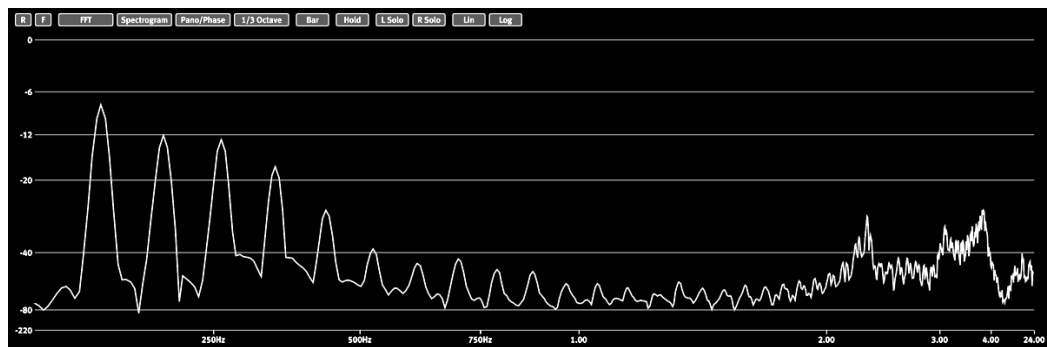


Abb. 12: Formanten des Vokals E eines männlichen, deutschen Sprechers bei einer Grundfrequenz von ca. 90 Hz und entspr. Obertönen bei ca. 180, 270, 360, 450, 540 Hz. etc. Die Formanten liegen bei etwa 250 Hz, 2,2 kHz und 3,5 kHz. Quelle: der Autor.

14 A.a.O., S. 158.

15 Cook: »Voice Physics and Neurology«, S. 112.

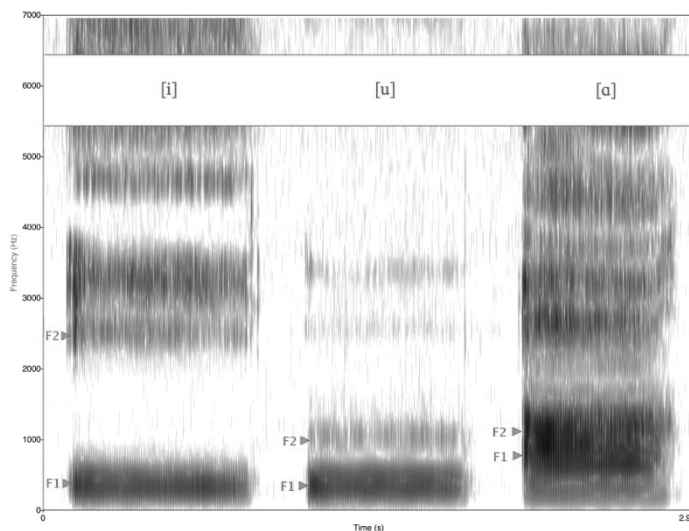


Abb. 13: Formanten dreier Vokale in US-amerikanischem Englisch. Für das I liegen sie bei ca. 400 und 2.500 Hz, für das U bei 400 und 1.000 Hz und für das A bei ca. 800 und 1.200 Hz. Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectrogram_-iua-.png (eingesehen am 19.7.2020). Lizenziert unter Creative Commons CC BY 2.0.

Der 1936 in den Bell Labs entwickelte ›Vocoder‹ formt diesen Artikulationsvorgang mit dynamischen Filtern nach, um Sprachlaute zu synthetisieren. Er basiert auf einer Analyseeinheit, einem Übertragungssignal und einer Syntheseeinheit mit parallel nebeneinander angeordneten Terz- oder Vierteloktavfiltern.¹⁶

3.2 SCHALLÜBERTRAGUNG IM RAUM

Bei der Schallübertragung in der Luft eines abgeschlossenen Raums wirken primär zwei Filterprinzipien. Erstens werden Schwingungen oberhalb ca. 2.000 Hz in Abhängigkeit von Lufttemperatur und -feuchtigkeit durch Dissipation mit steigender Frequenz zunehmend abgeschwächt. Für 10.000 Hz beträgt diese Dämpfung bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit in 100 Meter Abstand von der Schallquelle ca. 16 dB.¹⁷ Für das menschliche Ohr ist diese Höhendämpfung ein wichtiges Maß für die Einschätzung der Distanz einer Schallquelle.

Zweitens bewirkt das Verhältnis von Frequenzanteilen, die an Raumbauteilen (Wände, Decken, Möbel) wie auch an den darin befindlichen Menschen reflektiert oder absorbiert werden, komplexe Filterwirkungen. Um je nach Verwendung des Raums eine angemessene Akustik zu erzielen, werden poröse Materialien eingesetzt, um hohe Frequenzen durch den Strömungswiderstand in engen Poren zu absorbieren. Sog. Plattenresonatoren entziehen dem Schallfeld im Umfeld der Resonanzfrequenz der Platte Energie, was normalerweise für mittlere Frequenzen angewendet wird. Sog. Helmholtz-Resonatoren absorbieren Schall im

¹⁶ Maempel u.a.: »Audibearbeitung«, S. 760.

¹⁷ <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-luft.htm> (eingesehen am 19.7.2020).

tieffrequenten Bereich durch ein Luftvolumen, das als Feder wirkt und einen Resonatorhals, dessen Luftinhalt die Masse eines Feder-Masse-Systems darstellt. Auch die ›Publikums-Absorption‹ spielt eine große Rolle. Abhängig von Besetzungsdichte, Sitzreihenabstand, Kleidung etc. bewirken die Menschen im Raum erhebliche Absorptionen im mittleren und hohen Frequenzbereich.¹⁸ Überdies erzeugen auch Hindernisse zwischen Klangquelle und Hörort eine deutliche Filterung, da tiefe Frequenzen sich weitgehend unbeschadet um diese herum beugen, hohe Frequenzen dies aber deutlich weniger tun. Eine Säule im Raum stellt also einen Tiefpassfilter dar.

3.3 SCHALLWANDLUNG

Elektronische und digitale Audiofilter können logischerweise nur auf Klänge angewendet werden, die entweder als elektrischer Spannungsverlauf oder als digitale Audiodaten vorliegen. Um einen Klang elektronisch zu filtern, muss der Klang also zuerst durch ein Mikrofon aus Luft- oder Körperschall in ein elektrisches Signal gewandelt werden, kann dann elektronisch gefiltert und daraufhin durch einen Lautsprecher z.B. in Luftschall zurückgewandelt werden. Soll eine digitale Filterung erfolgen, ist sogar zusätzlich zu der genannten elektronischen Wandlung noch ein weiterer Wandlerschritt notwendig, nämlich die Digitalisierung durch das Sampling-Verfahren – da rein digitale Mikrofone (noch) nicht existieren.

Das Wandlungsprinzip früherer Konzepte der Klangspeicherung geht auf eine Analogie zum menschlichen Ohr zurück. Leon Scotts *Phonautograph* verwendete eine Membran, an der ein Schreibstichel so befestigt war, dass Membranauslenkungen durch Schall eine seitlich gezackte Kurve erzeugten, wenn man gleichzeitig das Papier darunter wegzog bzw. auf einer Walze drehte. Die Mechanik der Schallwandlung war dem menschlichen Trommelfell und den damit verbundenen Gehörknöchelchen nachempfunden. Jonathan Sterne bezeichnet daher alle Schallwandler als ›tympanic‹ (engl. *tympany* = Trommelfell), weil für alle Verfahren der Schallwandlung in Mikrofonen und Lautsprechern das Zusammenspiel von Trommelfell und Mittelohr als Vorlage gedient habe.¹⁹

Besonders markant – und von Radiosprecher*innen bewusst und versiert eingesetzt – ist der Nahbesprechungseffekt bestimmter Mikrofone, speziell bei der Bauart des sog. Druckgradientenempfängers. Nähert sich die Sprecherin dem Mikrofon unter eine Distanz von ca. 30cm, steigt der Bassanteil des Mikrofonsignals relativ zu den anderen Frequenzanteilen deutlich an, was die Stimme voluminös und mächtig klingen lässt. Der US-amerikanische Radio-DJ Casey Kasem beschreibt, wie Sprecher dieses Mittel bewusst einsetzen:

¹⁸ Ahnert/Tennhardt: Raumakustik, S. 233ff.

¹⁹ Sterne: *The Audible Past. Cultural Origins of Sound Reproduction*, S. 22.

First, you learn to use a mike the way a violonist does his instrument. Control your voice; let the mike do the exaggerating for you. It makes a slight rise in volume sound bigger than it is. When you underplay, it picks up every little nuance you breathe. Get closer and let your voice drop and come out easily, your voice sounds bigger; further away, it sounds thinner.²⁰

3.4 SPEICHERUNG AUF EINEM MATERIELLEN TRÄGERMEDIUM²¹

Während Leon Scotts Phonautograph Schall nur als Linie (also im engeren Sinn) *aufzeichnen* konnte, gelang Thomas Edison mit dem Phonographen durch Einritzen in weiches Material eine reversible Aufzeichnung. Der Mechanismus stellt einen drastischen Hochpassfilter dar. Die hörbare Wiedergabe tieffrequenter Klänge erfordert viel mehr Energie, als der kleine, verstärkerlose Apparat abgeben kann, u.a. weil das Ohr im Bassbereich runde 60 dB höhere Schalldrücke als bei 1 kHz erfordert, um überhaupt etwas zu hören.

Für die Entwicklung der Langspielplatte bediente man sich elektronischer Filter. Die sog. Vorverzerrung dient primär der Ökonomie, nämlich weniger Platz für eine Rillbreite zu verbrauchen und damit mehr Rillen, also eine längere Spieldauer auf einer Schallplatte unterzubringen. Zu dem Zweck werden Bassfrequenzen vor der Aufzeichnung stark abgesenkt und somit der bei diesen Frequenzen viel größere Schwingungsausgang des Schneidstichels vermindert. Zugleich werden hohe Frequenzen angehoben, da sich ihre sehr kleinen Auslenkungen dem Bereich der Korngröße des Vinylmaterials und somit dem Materialrauschen der Platte nähern. Nach Abtastung durch die Plattenspielnadel müssen die tiefen Frequenzen daher wieder um denselben Wert angehoben und die hohen Frequenzen abgesenkt werden. Dies erledigt der sogenannte ›Entzerrer-Vorverstärker‹, der in jedem Phono-Eingang eines Stereoverstärkers verbaut ist. Den Effekt der Vorverzerrung kann man sich ganz einfach zuhause anhören, indem man das Kabel eines Plattenspielers nicht in den dafür vorgesehenen Phono-Eingang, sondern in einen regulären Eingang (CD, Aux o.ä.) des Verstärkers steckt. Das Signal ist dadurch erheblich leiser, man muss also den Lautstärkereger weiter aufdrehen, um etwas zu hören. Vor allem aber klingt das Signal extrem grell und bassarm.

20 Zit. nach Hall/Hall: This Business of Radio Programming. A Comprehensive Look at Modern Programming Techniques used throughout the Radio World, S. 59.

21 Auch die Wandlung analoger in digitale Signale nach dem Abtast- oder Sampling-Theorem von Claude E. Shannon sowie die verlustbehaftete Datenkompression z.B. beim MP3-Format stellen komplexe Filter dar, können aber aus Platzgründen hier nicht behandelt werden. Vgl. Lerch/Weinzierl: Digitale Audiotechnik (Sampling) und Sterne: The MP3 as Cultural Artifact (MP3).

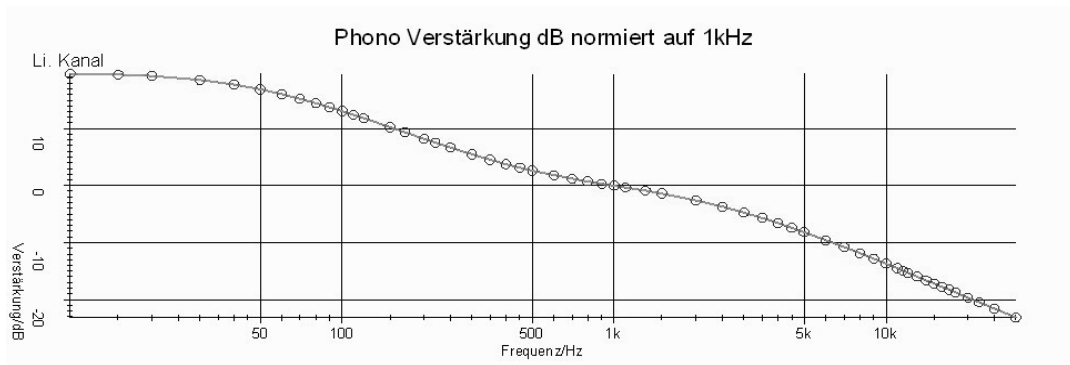


Abb. 14: Übertragungsfunktion eines Entzerrer-Vorverstärkers für Phonosignale. Quelle: https://www.amplifier.cd/Verstaerker/Plattenspieler_Verstaerker/Plattenspieler_Verstaerker.html (eingesehen am 19.7.2020)

3.5 AUDITIVES WAHRNEHMUNGSSYSTEM²²

Bei der Klangwahrnehmung im menschlichen auditiven System spielt u.a. der psychoakustische, vermutlich im Mittelhirn auftretende Effekt der ›Critical Bands‹ eine große Rolle. Demnach sind Frequenzen, die innerhalb eines Critical Bands liegen, schwer zu unterscheiden und wirken im Zusammenklang rau. Max Mathews und John Pierce konnten in Experimenten zeigen, dass die Auslassung von Teiltönen in dem Bereich, wo sie zusammen mit anderen in ein Critical Band fallen, der Rauheit von Klängen entgegenwirkt. Die so erzeugten ›Holy Tones‹²³ ähneln dem Frequenzspektrum guter Geigen, deren Korpusresonanzen selektiv Teiltöne der Saitenschwingungen unterdrücken, die sonst aufgrund des psychoakustischen Critical-Bands-Effekts als rau empfunden würden. Antonio Stradivari war also ein brillanter Filter-Ingenieur.

4. KÜNSTLERISCHE ANWENDUNGEN VON FILTERN

4.1 MIKROPHONIE I

Karlheinz Stockhausen arbeitet in seiner elektroakustischen Komposition *Mikrophonie I* (1965) gezielt mit vier verschiedenen Formen von Filterung. Er teilt jeweils zwei von sechs Spielern eine bestimmte Rolle zu: Es gibt zwei ›Klangerreger‹, zwei ›Mikrophonisten‹ und zwei ›Spieler‹ am Mischpult. Erstere a) ›filtern‹ das Frequenzspektrum eines Tamtams (eine Art besonders großer Gong, der allerdings anders

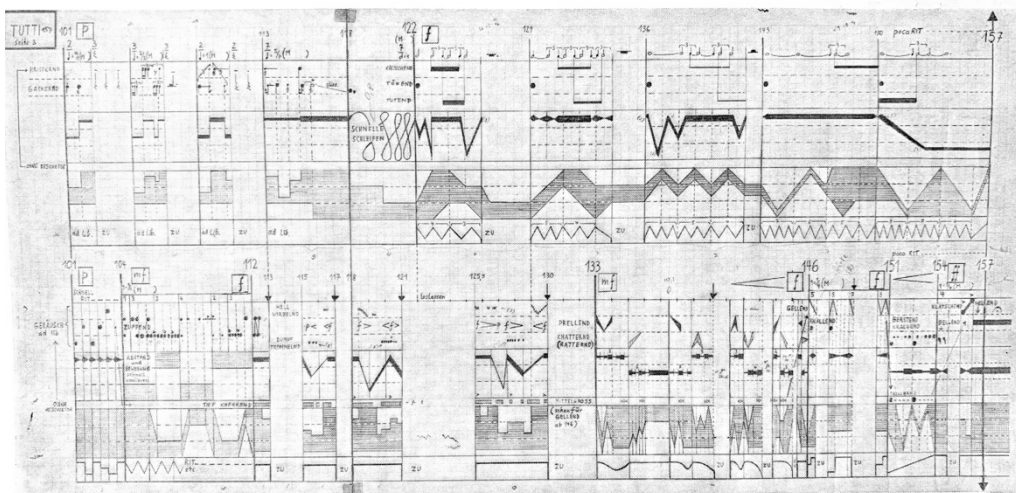
²² Auch die Schallwandlung durch Lautsprecher, die Schallübertragung im Raum der Hörer*innen und die Schallwandlung durch das Außenohr (Effekte der Abschattung, Bündelung und Resonanz durch Ohrmuschel, Gehörgang und Trommelfell), Mittelohr (Hebelmechanik von Hammer, Amboss und Steigbügel) und Innenohr (Erzeugung von Nervenimpulsen in der Gehörschnecke/Cochlea) stellen Filter dar. Auch Platzgründen bleiben auch sie hier unbehandelt. Vgl. Pierce: *Klang. Musik mit den Ohren der Physik*.

²³ Mathews: »Introduction to Timbre«, S. 82ff.

als dieser kein tonales, sondern ein weitgehend geräuschhaftes Frequenzspektrum hervorbringt) beim Anschlagen durch unterschiedliche Materialien und Anschlagpunkte. Zweitens tun dasselbe b) durch Veränderung des Mikrofonabstandes und c) des Mikrofonortes über der Fläche des Instruments. Die letzten beiden d) verändern die Einstellungen elektronischer Filter (Bandbreite und Mittenfrequenz eines Durchlassbereiches) auf dem besonders intuitiv regelbaren *Hörspielverzerrer Maihak W49*, der mit einer Flankensteilheit von 40 dB/Oktave besonders selektiv arbeitet.

Die Aufteilung des musikalischen Prozesses in drei selbständige Bereiche (Schallerzeugung, Schallaufnahme, Schalltransformation) macht es möglich, alle Erfahrungen der instrumentalen Praxis mit denen der elektronischen Klangtechnik kontinuierlich zu verbinden. [...] Der Titel MIKROPHONIE weist ferner darauf hin, daß normalerweise unhörbare Schwingungen (eines Tamtams) durch einen aktiven Prozeß des Abhorens hörbar gemacht werden (dem Abhören eines Körpers durch einen Arzt vergleichbar); das Mikrophon wird, entgegen seiner bisherigen passiven Funktion möglichst getreuer Wiedergabe, aktiv als Musikinstrument verwendet.²⁴

Nachdem Stockhausen im Kölner NWDR-Studio die Möglichkeiten elektronischer Klangbearbeitung kennengelernt und sich auch viel mit Akustik befasst hatte, war hier also sein Ziel, die Übertragungsfunktionen verschiedener Glieder der Filterkette vom akustischen Instrument bis zur elektronischen Nachbearbeitung gleichermaßen kompositorisch zu steuern.



Die untere Rubrik für den 3. Spieler (für Filter und Regler) ist zweigeteilt: die schraffierten Flächen geben an, welche Frequenzbereiche durch das elektrische Filter durchgelassen werden; und darunter stehen die 'Hüllkurven' für den Lautstärkeverlauf, der mit einem kontinuierlichen Flachbahn-Regler geregelt wird. Dasselbe wiederholt sich im unteren System für Gruppe II (4., 5., 6. Spieler).

24 Stockhausen: Mikrophonie I (1965) für Tamtam, 2 Mikrophone, 2 Filter und Regler, S. 57.

Abb. 15: Partiturseite aus *Mikrophonie I* von Karlheinz Stockhausen mit Hinweisen zur Rolle des ›Spielers‹. Quelle: Stockhausen: *Mikrophonie I* (1965) für Tamtam, 2 Mikrophone, 2 Filter und Regler, S. 65.

4.2 TRAFFIC MANTRA

Mit Resonanzen von Hohlräumen arbeiten verschiedene Klangkünstler, u.a. Sam Auinger und Bruce Odland in ihrer Installation *Traffic Mantra* (1991) im Trajansforum in Rom. Leere Amphoren filtern in Abhängigkeit von ihren Ausmaßen einzelne Frequenzen aus den Verkehrsgeräuschen heraus und heben sie überproportional zu stehenden, ›singenden‹ Tönen hervor. Sie schließen damit an eine griechische Bautradition an, die durch Vitruv überliefert ist. Vitruv empfahl die Aufstellung bronzener Gefäße (Echeia) an bestimmten Plätzen in Theaterräumen. Die Resonanzen der Gefäße waren in bestimmten Verhältnissen der harmonischen Reihe zueinander gestimmt.

Hence in accordance with these enquiries, bronze vases are to be made in mathematical ratios corresponding with the size of the theatre. They are to be so made that, when they are touched, they can make a sound from one to another of a fourth, a fifth and so on to the second octave. [...] Thus by this calculation the voice, spreading from the stage as from a centre and striking by its contact the hollows of the several vases, will arouse an increased clearness of sound, and, by the concord, a consonance harmonising with itself.²⁵

Athanasius Kircher bezweifelt in seinem interdisziplinären akustischen Kompendium *Musurgia universalis* aus dem Jahr 1650 den von Vitruv gepriesenen Effekt einer deutlichen Verstärkung harmonischer Klangbestandteile von Musik und Sprache.²⁶ Vorstellbar ist aber, dass sich die Schauspieler durch das vermutlich eher subtil klingende Resonanzsystem auf bestimmte Tonhöhen einstimmten und ihr Vortrag dadurch in einem gewissen Einklang miteinander erfolgte.

25 Vitruvius: De architectura Libri X.

26 Kircher: *Musurgia universalis*.

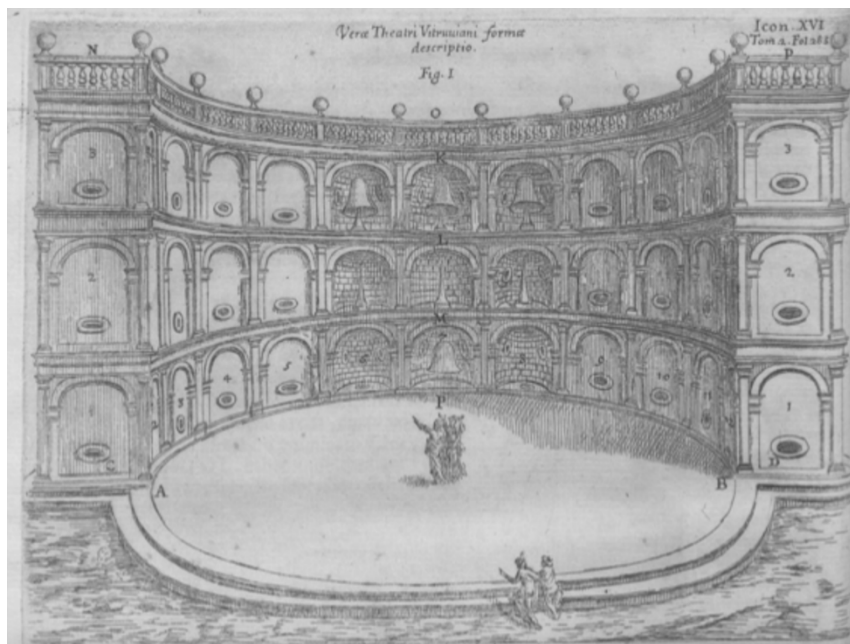


Abb. 16: Athanasius Kirchers Darstellung der Anordnung von Echeia nach Vitruv. Quelle: Kircher: *Musurgia universalis*, Buch IX.

5. SCHLUSS

Das gebräuchliche audiotekhnische Verständnis von Filterung weist eine Besonderheit auf: Es bezeichnet einen Prozess, bei dem – anders als etwa in Bereichen wie der Filterung von Lebensmitteln, Nachrichten oder Suchmaschinenergebnissen²⁷ – in den meisten Fällen kein Signalanteil durch den Filter ganz wegfällt. Stattdessen werden i.d.R. graduelle Klanganpassungen durchgeführt. Das wird dem gängigen Bild des Filters eigentlich nicht gerecht. Am präsentesten sind wohl Prinzipien wie das des Kaffeefilters (Melitta oder Bodum) oder des Rußfilters (Kohlekraftwerk oder Zigarette), die die Aufgabe haben, einen bestimmten Inhaltsstoff eines Stoffgemischs möglichst vollständig zu entfernen (wenn auch mit gemischtem Erfolg), um die verbleibenden Stoffe möglichst pur dem Genuss zuzuführen. Audiofilter weichen von diesem Begriffsverständnis ab, da sie das vergleichsweise subtilere Ziel der ›Balancierung‹ eines insgesamt zu erhaltenden Datenspektrums verfolgen.

Jeder Schritt in der Kette von der Erregung über das In-Form-bringen, die Abstrahlung, die Wandlung von einer physikalischen oder logischen Repräsentationsform in eine andere, die räumliche und mediale Übertragung und Speicherung bis zur nervlichen und präkognitiven Verarbeitung stellt einen jeweils individuellen Filterprozess dar. Von keinem dieser Prozesse ließe sich eine ideale Übertragungsfunktion, also eine Art ›neutrale‹, nicht verfälschende Filterung (oder gar eine

27 Bei Suchmaschinen tritt die Differenz nur bei häufigen Suchbegriffen auf. Beim Begriff ›Sex‹ z.B. bräuchten Menschen grob geschätzt etwa 20 Lebensdauern, um alle 3,5 Milliarden Google-Ergebnisse anzusehen.

Nicht-Filterung) bestimmen und realisieren, auch wenn uns viele Alltagsweisheiten dies suggerieren: die Rede vom unverfälschten, originalgetreuen Klang einer Stereoanlage, von unmittelbarer, echter Wiedergabe einer Stimme, vom lebens-echten Klang der Geräusche in einem Film machen uns glauben, es gäbe ›den‹ ei-gentlichen Klang eines Konzertflügels, eines Menschen, von knirschendem Kies. Diese Vorstellungen treffen nicht zu. Vielmehr ist es umgekehrt so, dass Filterung die empfundene Qualität im positiven Sinne prägt, ja den Eindruck von klangästhe-tischer Ausgewogenheit oder Realitätsnähe überhaupt erst hervorbringt. *The filter is the message.*

Die große Anzahl aufeinander folgender Filterprozesse bei der medialen Spei-cherung und Übertragung von Klang macht das Ergebnis anfällig für Störungen, bietet aber zugleich an verschiedenen Stellen Korrekturmöglichkeiten, falls ein vor-oder (!) nachgeschalteter Filter von Idealvorstellungen abweichende Charakteris-tika im Klangbild erzeugt. Noch einmal mit Verweis auf McLuhan lässt sich feststel-len, dass die in den Medien existierenden Ideale von Filtereinstellungen weitgehend durch Standards geprägt sind, die den Anforderungen der medialen Anwendungen selbst entsprechen.

Für letztere These soll hier ein sprechendes Beispiel angehängt werden: der Kies, den wir häufig als Schrittgeräusch im Film hören. Nähme man ihn aus dem Set-Sound, klänge er fast immer flach, dünn, ausdruckslos. Tatsächlich aber wünscht man sich von solchen Geräuschen, dass sie bestimmte Merkmale der dra-maturgischen Situation wiedergeben, weswegen unbeschwertes Kinderspiel auf Kies im Film vollkommen anders klingt als eine Hetzjagd auf demselben Unter-grund. Das erreicht man vielleicht durch die Wahl eines speziellen Kiesel im Film-sound-Studio, aber auch durch spezielle Mikrofonierung und digitale Filterung, oft auch Schichtung mehrerer Aufnahmen von Schrittgeräuschen übereinander. Die Begründung für solch eine ›realitätsferne‹ Inszenierung liegt darin, dass das Filmer-lebnis durch die Reduzierung auf zwei Sinne und auf das flache 2D-Bild gegenüber einem realräumlichen Erlebnis sinnlich verarmt ist und fehlende Eindrücke aus einem realen Raum durch Intensivierung der verbleibenden Sinneskanäle ersetzt werden müssen: Wo wir den feuchten Kies nicht riechen und die Kälte der Nacht nicht spüren können, hilft uns u.a. die ›aufgemotzte‹ Tonspur, die Situation in ihrer Gesamtheit besser nachvollziehen zu können.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ahnert, Wolfgang/Tennhardt, Hans-Peter: »Raumakustik«. in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Heidelberg 2008, S. 181-266.
- Cook, Perry R.: »Voice Physics and Neurology«, in: ders. (Hrsg.): Music, Cognition, and Computerized Sound. An Introduction to Psychoacoustics, Cambridge/London 2001, S. 105-116.

- Föllmer, Golo: »Theoretisch-methodische Annäherungen an die Ästhetik des Radios. Qualitative Merkmale von Wellenidentitäten«, in: Volmar, Axel/Schröter, Jens (Hrsg.): *Auditive Medienkulturen. Techniken des Hörens und Praktiken der Klanggestaltung*, Bielefeld 2013, S. 321-338.
- Hall, Claude/Hall, Barbara: *This Business of Radio Programming. A Comprehensive Look at Modern Programming Techniques Used Throughout the Radio World*. New York 1977.
- Katz, Bob: *Mastering Audio. The Art and the Science*, Oxford ²2007.
- Kircher, Athanasius: *Musurgia universalis*, Buch IX, Rom 1650. Deutsche Übersetzung hrsg. von Markus Engelhardt und Christoph Hust, Leipzig o.J.
- Krause, Manfred: »Das Gravesaner Studio und seine Ausstrahlung«, in: Pauli, Hansjörg/Wünsche, Dagmar (Hrsg.): *Hermann Scherchen. Musiker 1891-1966*, Berlin 1986, S. 116-120.
- Lerch, Alexander/Weinzierl, Stefan: »Digitale Audiotechnik. Grundlagen«, in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Heidelberg 2008, S. 785-811.
- Meyer, Jürgen: »Musikalische Akustik«, in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Heidelberg 2008, S. 123-180.
- Maempel, Hans-Joachim u.a.: »Audiobearbeitung«, in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Heidelberg 2008, S. 719-784.
- Mathews, Max: »Introduction to Timbre«, in: Cook, Perry C. (Hrsg.): *Music, Cognition, and Computerized Sound. An Introduction to Psychoacoustics*, Cambridge/London 2001, S. 79-87.
- Pierce, John R.: *Klang. Musik mit den Ohren der Physik*, Heidelberg 1985.
- Pinch, Trevor/Trocco, Frank: *Analog Days. The Invention and Impact of the Moog Synthesizer*, Cambridge u.a. 2004.
- Sengpiel, Eberhard: *Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudiotechnik*, <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-luft.htm> (eingesehen am 19.7.2020)
- Sterne, Jonathan: *The Audible Past. Cultural Origins of Sound Reproduction*, Durham/London 2003.
- Sterne, Jonathan: »The MP3 as Cultural Artifact«, in: *New Media & Society*, Vol. 8 (5), 2006, S. 825-842.
- Stockhausen, Karlheinz: »Mikrophonie I (1965) für Tamtam, 2 Mikrophone, 2 Filter und Regler«, in: Schnebel, Dieter (Hrsg.): *Karlheinz Stockhausen. Texte zur Musik 1963-1970 (Band 3)*, S. 57-65.
- Vitruvius: *De architectura Libri X*, Buch V. <http://www.vitruvius.be/boek5h5.htm> (eingesehen am 19.7.2020)
- Zölzer, Udo: »Signalverarbeitung, Filter und Effekte«, in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Heidelberg 2008, S. 813-884.