

Bachelorarbeit

im Studiengang Audiovisuelle Medien

Die Wahrnehmung von Rauschen und dessen praktischer Einsatz zur Klanggestaltung

vorgelegt von

Tobias Neumann

Matrikel Nr.: 17786

an der Hochschule der Medien, Stuttgart
am 13.03.2010

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell



Rauschen

I. Abstract

Das Rauschen ist längst nicht mehr nur ein Störsignal. Als ein Signal das theoretisch alle anderen Signale enthält, bildet es die Grundlage von allem. Jedoch unterscheiden sich die Möglichkeiten des Einsatzes von Rauschen immer noch mit den in den Köpfen der Menschen festgesetzten Vorstellung des Rauschens. Ein nervtötendes Signal, das wichtige Information verdeckt und unkenntlich macht. Aber lohnt sich ein Blick in die genauere Zusammensetzung von Rauschen um dies zu konkretisieren und zu verstehen welche möglichen positiven Aspekte man aus diesem ziehen kann.

Genau dies ist die Grundlage, der Untersuchung der Wahrnehmung von Rauschen und dem Einsatz zur Klanggestaltung in der Musikproduktion, dieser Arbeit. Die negativen Aspekte des Rauschens und die voreingenommene Einstellungen sollen beiseite geschafft werden. Naturphänomene wie zum Beispiel das Meeresrauschen zeugen schon von einer anderen Vorstellung des Rauschens. Was unterscheidet dies von dem als Störung angesehenen Rauschen und lässt sich darauf auf positive Aspekte und den beabsichtigten Einsatz des Rauschens als Stimmungsträger in der Musik zielen?

Bücher über das Rauschen in seiner technischen Hinsicht und als Beschreibung in der Informationstheorie gibt es zu Genüge, aber der kreative Gedanke, der sich mit einer positiven Absicht des Rauschens befasst, kommt darin so gut wie nie vor. Deshalb steht hier ein Bereich zur Verfügung, der noch viel neues Wissen bereit hält und eine Menge eigener Interpretationsgabe zulässt. Herausfordernd ist hierbei vor allem der Stand bei der Untersuchung einzelner Rauschphänomene und der daraus resultierenden kaum vorhandenen Literatur. Mit Hörversuchen sollen auch Arbeitsschritte wissenschaftlich belegt und aufgestellte Thesen in ihrer Aussage bekräftigt werden.

II. Erklärung

Hiermit versichere ich, meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel zur Bearbeitung herangezogen zu haben.

Ort, Datum

Tobias Neumann

III. Danksagungen

Diese Arbeit konnte nur mit der Unterstützung von mehreren Seiten realisiert werden, wofür ich meine Dankbarkeit aussprechen möchte.

- Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Oliver Curdt, sowie Herrn Prof. Jens-Helge Hergesell für die begeisterte Aufnahme meines Themenvorschlags und die Unterstützung dieser Arbeit. Ihr fundiertes Wissen und Anmerkungen zum Thema halfen mir bei der Durchführung dieser Arbeit sehr weiter.
- Dank geht auch an Dipl. Ing. Jörg Bauer der mir immer das nötige Equipment und die Räumlichkeiten des AM-Tonstudios zur Verfügung stellte.
- Besonderer Dank geht auch an das Teldex Studio in Berlin, besonders Tom Russbüldt, für die Bereitstellung ihrer Studiokapazitäten und die Unterstützung bei der Vorbereitung meiner Hörversuche.
- Ich danke allen Teilnehmer des Hörversuchs ohne die ein Großteil dieser Arbeit nicht möglich gewesen wären.
- Danke geht auch an Dominik Heer und Antonio Raimondo für die Unterstützung bei den Vorversuchen und der immer konstruktiven Kritik.
- Besonderer Dank an Alexander Lengle für das Einspielen des Schlagzeugs und als ständiger Gesprächspartner zum fachsimplen und John Robinson zur Verfügung stellen des Songs „Ohne Uns“.
- Der größte Dank gilt aber meinen Eltern die mich bei allem unterstützen und ohne die das Studium nicht realisierbar gewesen wäre.

IV. Inhaltsverzeichnis

I. Abstract	II
II. Erklärung	III
III. Danksagungen	IV
IV. Inhaltsverzeichnis	V
V. Abkürzungen und Glossar	VII
1. Vorwort	1
2. Analoge Signalverarbeitung.....	3
2.1 Grundlagen der analogen Signalverarbeitung.....	3
2.2 Schaltungstechniken.....	5
2.2.1 Röhrentechnik	5
2.2.2 Transistorentechnik	7
2.2.3 Operationsverstärkern	10
2.3 Fehlerquellen und Nachteile der Analogtechnik	13
3. Rauschen.....	14
3.1 Was ist Rauschen? Eine Definition und Erklärung von Rauschen	14
3.1.1 Stochastische Verteilung.....	15
3.1.2 Rauschen im Frequenzbereich.....	16
3.2 Arten von Rauschen	18
3.2.1 Thermisches Rauschen	19
3.2.2 Schrotrauschen	20
3.2.3 1/f-Rauschen.....	20
3.2.4 Funkelrauschen	21
3.2.5 Generations-Rekombinations-Rauschen.....	22
3.2.6 Stromrauschen	22
3.3 Rauschen der Bauteile.....	23
3.3.1 Rauschen bei Widerständen	23
3.3.2 Rauschen bei Röhren	24
3.3.3 Rauschen bei bipolaren Transistoren.....	24

3.3.4 Rauschen bei Feldeffekttransistoren.....	25
3.3.5 Rauschen des Operationsverstärkers.....	26
3.4 Rauschen in der Digitaltechnik.....	27
4. Wirkung & Wahrnehmung von Rauschen.....	28
4.1 Menschliche Wahrnehmung - Ein kurzer Überblick	28
4.2 Was rauscht, was klingt?	29
4.3 Die Entspannung liegt im Meeresrauschen.....	34
4.4 „Hilfe, es rauscht...!“	38
4.5 Die farbige Welt des Rauschen	39
4.5.1 Rauschen eines Kompressors	45
5. Klanggestaltung mit Rauschsignalen	47
5.1 Das gute im Rauschen.....	48
5.2 Betone die Schwachstelle.....	51
5.3 Rauschen als Gestaltungsmittel	53
5.3.1 Ambience Effekt durch Rauschen	53
5.3.2 Rauschen als Bezug zur Analogtechnik	54
5.3.3 Realistische Trommelgeräusche	55
5.4 Beispiele vom Einsatz des Rauschens in der Praxis	56
6. Hörversuche	58
6.1 Vorbereitungen	58
6.2 Versuchsdurchführung	61
6.3 Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche.....	61
7. Schlusswort	68
VI. Begleitende Audio-CD.....	70
VII. Quellenverzeichnis.....	71
VIII. Abbildungsverzeichnis	73
IX. Anhang	75
1. Formular zum Hörversuch.....	75
2. Schaltplan des Fairchild Kompressors	77

V. Abkürzungsverzeichnis und Glossar

AM	Studiengang Audiovisuelle Medien
BPM	Beats Per Minute
dB	Dezibel
dBFS	Dezibel im digitalen Bezug
FET	Feldeffekttransistor
Hz	Hertz (kHz: Kilohertz)
LTI	Linear time-invariant System
OP	Operationsverstärker
Q	Transistor
R	Widerstand

Physikalische Größen

μ	Mittelwert
$\rho(\tau)$	Autokorrelationsfunktion
σ	Standardabweichung
$\varphi(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit
e	Elementarladung $0,16022 \cdot 10^{-18} \text{ C}$
k	Boltzmannkonstante $13,806 \cdot 10^{-24} \text{ J/K}$
$P(a \leq x \leq b)$	Wahrscheinlichkeitsfunktion
T	Temperatur
U_R	Effektivwert der Rauschspannung
$W(f) = a^2$	Energiedichte des Rauschens

1. Vorwort

„in the immediate future the point of disagreement will be between noise and so called musical sounds“ (John Cage: *Silence*, 1961¹)

Die moderne zeitgenössische Musik erscheint manchmal schon etwas langweilig. Vorhersehbare Harmoniestrukturen, immer dieselbe Melodie und der gleiche schematische Aufbau lassen jedes zweite Lied gleich klingen. Aus der Vorhersehbarkeit wird Wiederholung und schließlich Langeweile. Wer neues schaffen will, muss sich abheben und neuen Strategien öffnen. Bekannte Strukturen müssen aufgelöst werden, damit ein gewisses Maß an Neugierde und Überraschung entsteht. Und was eignet sich für den Überraschungseffekt besser als ein Zufallssignal, Rauschen. Die Avantgarde der neuen Musik baut auf dem Prinzip der erweiterten Mittel der Klanggestaltung. Musikalische Klänge bestehen hier neben Geräuschen und verwischen zu einem neuen Konstrukt das sich jeglichen, aus Schallwellen bestehenden, Mitteln öffnet. Das Rauschen als all umfassendes Symbol, ist Synonym für die Dissonanz bestehender Formen.

Die interessantere Gestaltung wird aber durch die gestörte Wahrnehmung zu Rauschen im Allgemeinen überschattet. Gruselgeschichten aus den Anfängen der Musikproduktion erklären das Rauschen zum größten Feind in der Tontechnik. Die Wahrnehmung hat sich in den Köpfen fest verankert und beschränkt dadurch den kreativen Freiraum der sich durch das Rauschen ergibt. Besonders heutzutage in den „klinischen“ Produktionsumgebungen in der Art von digitalen Workstations lassen das Problem größer wirken als es eigentlich ist. Dabei stellt sich die Frage, ob ein bisschen Rauschen wirklich so schlimm ist und sich eine beabsichtigte Wahrnehmung erzielen lässt.

Rauschen mit seinen in der Natur vorkommenden Arten zeugt doch schon von einer Unterscheidung in der Wahrnehmung. Jeder fühlt sich durch den Lärm des Verkehrs auf der Autobahn oder dem Rauschen der Stadt mit all seinen störenden Facetten einer ständigen akustischen Belästigung und Reizung ausgesetzt. Den gegenwärtigen Kontrast bildet das Meeresrauschen, Rauschen eines Wasserfalls oder den durch die Blätter des Waldes rauschenden Wind. All dies bekommt man sogar als Entspannungs-CDs um aus der lauten Welt zu flüchten. Diese zwei Gegensätzlichen Rauscharten definieren auch schon eine Unterscheidung von Rauschen und sagen voraus das es unterschiedliche Arten von Rauschen geben muss. Welche Rauscharten sind dies und warum ist das eine Rauschen störend und das

¹ zitiert nach Weibel (1995), S. 87

andere nicht? Wie unterscheiden sich diese? Und wie kann man sich den in einer positiven Wahrnehmung resultierenden Aspekt des Rauschens in der Musik zu nutzen machen um eine beabsichtigte Klanggestaltung zu erzielen?

Dies sind die Kernpunkte der Auseinandersetzung dieser Arbeit. Um zu verstehen wie das Rauschen als bewusster Stimmungsvermittler in der Musik eingesetzt werden kann ist es erstmal notwendig das Rauschen auf verschiedene Wege zu interpretieren. Jedoch wäre hier eine Abhandlung auf rein audioteknischer Ebene unzureichend, da in jedem Buch das Rauschen als Störsignal oder Testsignal angegeben wird und auch keine Betrachtung der Wahrnehmung vorgenommen wird. Viel wichtiger ist es das Rauschen in mehrerer Hinsicht zu untersuchen. Als erstes werden die technischen Grundlagen vermittelt um das Signalprinzip und die Zusammensetzung analoger Systeme zu verstehen. Aus den daraus resultierenden Fehlerquellen entsteht der Bezug zum Rauschen. Da sich Rauschen primär um ein naturwissenschaftliches Phänomen handelt, eignet sich die mathematische Beschreibungsweise hierfür am besten. Mit dem daraus gewonnenen Verständnis des Rauschens geht es zu den psychoakustischen und psychologischen Aspekten der Wahrnehmung anhand dessen resultierenden Definitionen und Charakterisierungen schliesslich der Einsatz als Gestaltungsmittel aufgezeigt werden.

Zur weiteren Unterstützung und Bekräftigung der angenommenen Thesen wurden zwei Hörversuche durchgeführt. Eine konkretisierte Darstellung der Hörversuche und deren Auswertung findet sich im letzten Kapitel dieser Arbeit.

2. Analoge Signalverarbeitung

2.1 Grundlagen der analogen Signalverarbeitung

Signale kommen in der Natur nicht nur als physikalische Größen vor, sondern sind auch Träger vieler verschiedener Informationen (Temperatur, Druck, Kraft, Weg, Helligkeit, Geschwindigkeit usw.)². Um diese Informationen einheitlicher und einfacher zu übertragen ist es notwendig, diese umzuwandeln. Dieser Schritt der Umwandlung steht unter anderem für die Verarbeitung von Signalen, der Signalverarbeitung. Die Signalverarbeitung umfasst alle Schritte, die dazu führen ein Eingangssignal auf ein Ausgangssignal abzubilden. Die Übertragung des Einganges auf den Ausgang geschieht hierbei in einem Übertragungssystem und kann neben der Umwandlung der akustischen in eine elektrische Information auch die Verstärkung, Komprimierung, Mischung, Modulation und die Bearbeitung des Signal sein. Ein System ist daher alles, das Signale übertragen und verändern kann.

In der Audiotechnik ist es von großer Bedeutung die Information der zu verarbeitenden Signale vollständig zu erhalten. Deshalb wird hier mit Linearen Systemen verarbeitet, so genannten LTI-Systemen (linear time-invariant = lineares zeitinvariantes System, Zeitinvariant bedeutet das der Zeitpunkt der Übertragung des Signals keine Rolle spielt). Auf dem Übertragungsweg vom Eingang zum Ausgang zeichnen sich diese LTI-Systeme durch ein lineares Verhalten aus, d.h. die Originalität des Ursprungssignals bleibt erhalten. Mathematisch ergeben sich hier einige Vorteile, da diese Systeme einfach zu charakterisieren sind. Neben dem Verstärkungsprinzip (Multiplikation mit einem Faktor) gilt auch das Superpositionsprinzip, durch das ein Signal in beliebig viele kleine Teilsignale (Summanden) formiert werden kann³. Folglich lässt sich ein noch so kompliziertes Signal anhand der Summe vieler Teilsignale charakterisieren. Auch geben diese Prinzipien eine Aussage über die möglichen Operationen die ein lineares System durchführen kann: Summation, Verstärkung, Differentiation und Integration. Dies sind aber alles Operationen bei denen lediglich der Frequenzgang eines Signals, also die Amplitude (Multiplikation mit Koeffizient) und der Phasengang (Summation oder Differentiation mit einer Zeitkonstanten, z.B. $y(t) = x(t-\tau)$), verändert wird, jedoch nicht die eigentliche Frequenz. LTI-Systeme reagieren immer mit derselben Frequenz am Ausgang mit der sie am Eingang angeregt wurde, d.h. am Ausgang sind nur die Frequenzen enthalten die im Eingangssignal enthalten waren.⁴ Durch diesen linearen Verlauf wird die Signalform im Zeitbereich und die spektrale Zusammensetzung

² s. Meyer (2006), S. 2

³ ebd., S.6f; Superpositionsgesetz: $y = y_1 + y_2 = f(x_1) + f(x_2) = f(x_1+x_2) = f(x)$

⁴ vgl. Meyer (2006), S.73

erhalten, d.h. es entstehen keine neuen Spektralanteile wie Obertöne und Verzerrungen im Ausgangssignal.⁵ Würde das System jedoch eine Multiplikation zweier Signale ($y(t) = x_1(t) * x_2(t)$) durchführen, hätte dies zur Folge, dass am Ausgang des Systems neue Frequenzanteile in dem zu übertragenden Ursprungssignal entstehen würden. Die dabei entstehenden neuen Frequenzanteile (Töne), genannt nichtlineare Verzerrungen, sind eine Abweichung des Signal von seiner ursprünglichen Form und prinzipiell unerwünscht. Sind die auftretenden Verzerrungen jedoch korrigierbar, d.h. lediglich die Amplitude der Teilsignale wurde verändert, handelt es sich um lineare Verzerrungen⁶ und daher auch um ein LTI-System. Filter und Equalizer produzieren z.B. lineare Verzerrungen, die zur Klanggestaltung sinnvoll sein können.

LTI-Systeme entsprechen keiner natürlichen Abbildung, weshalb die in der Realität und nicht im idealen Fall vorkommenden Systeme anfälliger für Verzerrungen (linear und nichtlinear) sind. Obwohl jedes audioteknische Gerät theoretisch ein nichtlineares System ist, können bei den meisten die Nichtlinearitäten vernachlässigt werden. Angegeben werden diese in den Datenblättern der Geräte als Klirrfaktor. Trotzdem bleiben u.a. der Verstärker und der Kompressor/Limiter nichtlineare Systeme, da ein Verstärker z.B. mit steigender Übersteuerung Obertöne erzeugt und ein Kompressor ein weniger verstärktes Ausgangssignal (theoretisch, ohne Einstellung des Make-up Gain) abliefert⁷. Solche Geräte, die zwar als linear gelten aber trotzdem geringe nichtlinearitäten aufweisen wird durch eine Approximation im Arbeitsbereich⁸ versucht Linearität zu erreichen um die mathematischen Vorteile der LTI-Systeme nutzen zu können. Nichtlinearitäten resultieren mit einem enorm gesteigerten Rechenaufwand, handelt es sich hierbei um komplizierte Differentialgleichungen. Als Beispiel sei hier der Transistor erwähnt, dessen Beziehung zwischen der Basis-Emitter-Spannung und dem Kollektorstrom exponentiell ansteigt. Durch Anlegen einer Tangente im Arbeitsbereich wird in der Umgebung des Arbeitsbereich die Kennlinie relativ genau beschrieben. Mit dieser Linearisierung im Arbeitsbereich kann das Eingangssignal in eine Fourier-Reihe zerlegt werden und durch die Superposition in kleinen einfachen Schritten beschrieben werden.

Ein System, linear oder nichtlinear, besteht in seinem inneren Aufbau aus komplexen elektronischen Schaltungen. Durch die verschiedenen Eigenschaften der möglich verwendeten Bauteile wie Widerstände, Röhren, Spulen, Transistoren, Dioden, Operationsverstärkern, etc. kann es zu Abweichungen ihres idealen Wertes kommen, die als Verzerrungen resultieren. Die

⁵ vgl. Skritek (1988), S.19

⁶ Raffaseder (2002), S.45

⁷ s. Görne (2008), S.129

⁸ vgl. Meyer (2006), S.72

Werte von Widerständen bewegen sich z.B. in einem Toleranzbereich der besonders bei Erwärmung enorm schwanken kann oder lassen sich Verstärker schnell übersteuern. All diese vorkommenden Verzerrungen addieren sich zur Gesamtstörung des Systems auf. Die Übertragungskennlinie wird nichtlinear.

2.2. Schaltungstechniken

Nach Betrachtung der Systemtheorie und einen Überblick über die Signalverarbeitung wird klar, dass durch den inneren Aufbau eines Systems eigentlich alle Geräte in der Audiotechnik nichtlinear sind. Auch wenn diese gering sind machen sich diese nichtlinearitäten akustisch bemerkbar und spiegeln sich in einer gestörten Signalübertragung wieder. Deshalb lohnt ein genauerer Blick in den inneren Aufbau eines System dessen Bauteile als Faktoren für eine signalbeeinträchtigende Störung gelten.

2.2.1 Röhrentechnik

Die Röhre war das erste aktive elektronische Bauelement, welches Signale modulieren und verstärken konnte. Ihre Entdeckung galt als Meilenstein in der Audiotechnik, denn durch sie liessen sich alle möglichen tontechnischen Geräte wie z.B. Verstärker und Mikrofone erstmals realisieren. Jedoch dominierten mit der Zeit einige Nachteile, wie z.B. die Größe und ihr hoher Preis und auch ihre Lebensdauer sprach nicht unbedingt für die Röhre. Mit der Zeit, wenn die Kathode der Röhre anfängt rau zu werden, begann die Röhre „zu rauschen, zu knistern und zu zischen“⁹. Trotz dieser Nachteile ist die Röhre auch heute noch beliebt. Besonders in Gitarrenverstärkern, in denen nichtlineare Verzerrungen und deren klangformende Obertöne gewünscht sind ist die Röhre gerne gesehen. Diese Verzerrungen stehen charakteristisch für den Röhrensound, weshalb sie heute vor allem als Effektgerät gilt, um einen besonders analogen Touch zu erzielen.

Aufbau und Bestandteile

Die Röhre besteht meistens aus einem Glaskolben und ist daher mechanisch sehr empfindlich. Im inneren der Röhre selbst herrscht ein Vakuum damit die Elektronen durch Gasmoleküle nicht abgebremst werden würden. Des Weiteren befinden sich in dem Glaskolben mehrere Elektroden (Gitter), die je nach Anzahl die genaue Funktion bestimmen. Prinzipiell ähnelt der

⁹ Friesecke (2007), S.245

Aufbau einer Glühbirne mit einer Glühwendel als Kathode und einem zusätzlichen Auffangblech als Anode.¹⁰

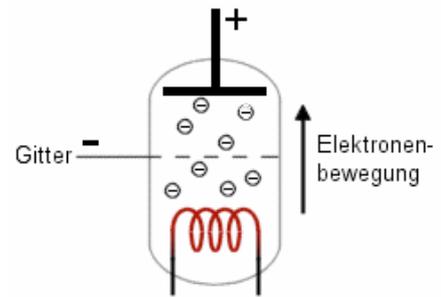


Abb. 1: Aufbau einer Röhrentriode

Funktionsprinzip

In Analogie zu der Glühbirne sind auch ihre grundlegenden Funktionen identisch, bei der durch Erhitzen des Heizdrahtes Elektronen freigesetzt werden. Jedoch verlassen bei der Röhre die Elektronen die Glühwendel und bewegen sich dadurch „frei“ im Raum. Diese Feststellung war der ausschlaggebende Punkt für die Realisierung der Röhre. Die Glühwendel als Kathode bringt die Elektronen mit ihrer Selbsterhitzung durch Wärme so stark in Bewegung, dass sie im Vakuum der Röhre als freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Die Anode bildet in der Röhre das Auffangblech für die Elektronen, d.h. dass die Ladungsträger immer von der Kathode zur Anode wandern.¹¹ Durch das Gitter, das sich zwischen Anode und Kathode befindet, kann der Stromfluss gesteuert werden. So lässt sich bei der Triode durch Anlegen einer negativen Spannung am Gitter steuern wie groß der Stromfluss zur Anode ist.

Folgende prinzipielle Funktionen hat die Röhre¹²:

- Diode: Die Röhre arbeitet lediglich als Ventil für den Stromfluss und besitzt kein Gitter. Dadurch, dass nur die Kathode Elektronen aussenden kann ergeben sich zwei Zustände: Sperr- und Flussrichtung. D.h. beim Anlegen des Minuspols an die Kathode und des Pluspols an die Anode werden genügend Elektronen erzeugt, die von der Kathode zur Anode wandern: Es fließt Strom. Beim Anlegen des Pluspols an die Kathode herrscht an dieser Elektronenmangel: Es fließt kein Strom.
- Triode: Bei der Triode befindet sich im Gegensatz zur Diode zwischen Kathode und Anode ein Sperrgitter. Durch die negative Spannung an der Kathode ergibt sich an dieser wieder ein Elektronenüberschuss und die Elektronen beginnen sich zur positiv gespeisten Anode zu bewegen. Jedoch können die Elektronen das positive Potenzial der Anode durch das Gitter nicht „sehen“ und werden deshalb nicht angezogen. Das bedeutet, dass am Gitter eine, im Gegensatz zur Kathode, negativere Spannung anliegt welche die Elektronen abstößt. Erst wenn die Spannung am Gitter geringer wird damit die Elektronen der Kathode nicht

¹⁰ vgl. Caspari (2010), <http://www.elektronikinfo.de/strom/roehren.htm> (Zugriff am 18.01.10)

¹¹ vgl. Friesecke (2007), S. 245

¹² Funktionen vgl. Friesecke (2007), S. 246ff

abgestoßen werden und wieder fließen können, können diese zur Anode gelangen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit die Menge der Elektronen mit der Spannung am Gitter zu steuern und einen viel höheren Anodenstrom zu erzeugen, da die Elektronen am Gitter zusätzlich abgestoßen werden. Dies war die erste elektronische Verstärkerschaltung.

Benannt nach der Anzahl der Gitter gibt es weitere Realisierungsaufbauten der Röhre, jedoch erhöht sich dadurch ihre Störanfälligkeit weil zusätzliche Potenzialunterschiede die Folge sind.

2.2.2 Transistorentechnik

Obwohl die Röhre schon ein Meilenstein in der elektronischen Entwicklung war und ist, wurde weiter nach Alternativen geforscht. Mit dem Aufkommen der Halbleitertechnik gelang den Wissenschaftlern ein weiterer Erfolg. So entstand mit dem Transistor ein neues Schalter-/Verstärkerelement, das ausschlaggebend durch die kleine Bauform und den geringen Preis erfolgreich wurde. Dadurch konnten vielmehr Bauteile auf geringerem Platz untergebracht werden und auch die Dimensionen der Geräte wurden wesentlich kleiner. Heutzutage finden diese ihren Einsatz in Mikrofonen, Mikrofonvorverstärkern und Endstufen.¹³ Als großer Vorteil gilt auch die viel geringere Leistungsaufnahme als bei Röhren.

Unterschieden werden die Transistoren in 2 Gruppen: bipolare und unipolare Transistoren.

Bipolare Transistoren

Der Bipolare Transistor, auch PNP oder NPN Transistor genannt, gilt als das wichtigste Grundelement zum Verstärken von Signalen. Sein Name resultiert aus den zwei unterschiedlichen gepolten Halbleitermaterialien. Halbleiter wie Silizium und Germanium sind Materialien, die bereits bei geringer Energiezufuhr zu Leitern werden.

Aufbau und Bestandteile

Wie schon erwähnt bestehen bipolare Transistoren aus Halbleitermaterial und besitzen insgesamt drei verschiedene Schichten, von den zwei gleich dotiert sind. Jede Schicht hat seinen eigenen Anschluss, genannt werden diese Kollektor, Basis und Emitter, z.B. wäre bei einem NPN-Transistor der Anschluss folgendes: N-dotiert - Kollektor, P-dotiert - Basis, N-dotiert - Emitter.

¹³ Friesecke (2007), S.259

Funktionsweise

Die Funktionsweise soll hier anhand des NPN-Transistors erklärt werden.

Der Transistor wird immer durch seine Basis angesteuert, bei der nur ein sehr kleiner Basisstrom fließt. Sofern durch die Basis kein Strom fließt und der Kollektor am Pluspol und der Emitter am Minuspol anliegt sperrt der Transistor, d.h. zwischen dem Kollektor und dem Emitter fließt kein Strom. Der am positiven Potenzial liegende Kollektor, von dem die negativ geladenen Elektronen der N-Schicht angezogen werden, bildet mit der am negativen Potenzial liegenden Basis, von der die positiv geladenen Elektronen der P-Schicht angezogen werden, eine Diode in Sperrschicht.

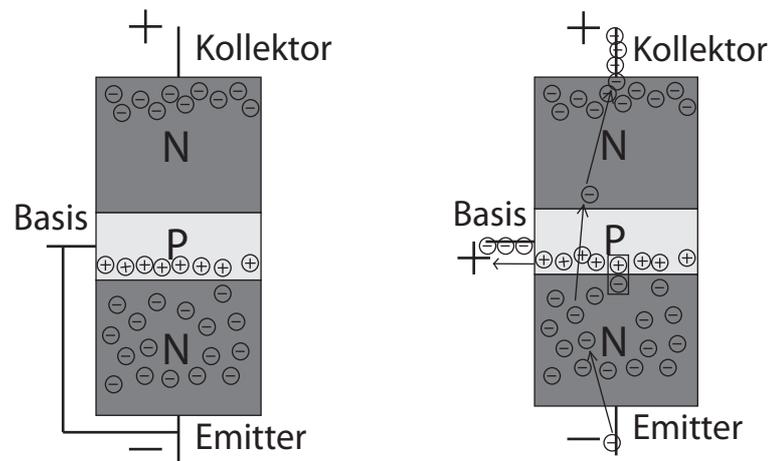


Abb. 2: Aufbau und Elektronenfluss eines NPN-Transistors

Wird an die Basis jetzt ein Strom angelegt, so dass an der Basis-Emitter-Strecke die „Diode“, also der PN-Übergang leitend wird er wird vom Kollektor zum Emitter leitend. Durch die dünne Basisschicht, die mit dem Emitter jetzt eine Diode in Durchlassrichtung darstellt, finden Elektronen der Emitterschicht auch ihren Weg zum Kollektor und werden von dessen positivem Potenzial angezogen. Das Resultat ist die leitende Kollektor-Emitter Strecke. Folglich ist der Basisstrom das Regelglied dieser Strecke.¹⁴ Dieser ist immer viel geringer als der steuerbare Kollektorstrom. Das konstante Verhältnis wird Stromverstärkungsfaktor B genannt $I_C = I_B \cdot B$.

Für optimale Arbeitsverrichtung und um ein lineares Arbeitsverhalten zu gewährleisten ist es immer wichtig den Arbeitspunkt möglichst genau einzustellen. Dieser ist jedoch wie bei allen Halbleitern, sehr stark temperaturempfindlich. Ein instabiler Arbeitspunkt der sich ständige verschiebt und sich als Verzerrungen bemerkbar macht ist genauso wie ein ansteigender Kollektorstrom die Folge einer Temperaturerhöhung.¹⁵ Aber durch eine Gegenkopplung kann

¹⁴ vgl. Caspari (2010), <http://www.elektronikinfo.de/strom/bipolartransistoren.htm> (Zugriff am 18.01.10)

¹⁵ s. Skritek (1988), S.73

zumindest eine Linearisierung der Übertragungskennlinie erreicht werden, wodurch der Klirrfaktor (Verzerrungen) reduziert wird und der Frequenzgang linearer verläuft.

Unipolare Transistoren

Die Unterscheidung zu den bipolaren Transistoren bilden die unipolaren Transistoren, Feldeffekttransistoren genannt. Anstatt der Steuerung mit Strömen wie bei den bipolaren Transistoren werden die FETs durch Spannungen gesteuert. Ein sehr hochohmiger Eingang ist die Folge der nahezu leistungslosen Ansteuerung.

Aufbau und Bestandteile:

In Analogie zum bipolaren Transistor besitzt der Feldeffekttransistor 3 Anschlüsse: Drain - Gate - Source (Vergleichbar mit Kollektor - Basis - Emitter). Jedoch passiert der Ladungstransport nicht durch zwei verschiedene dotierte Ladungsträger, sondern nur durch eine Halbleiterschicht die einen Kanal bildet. Drain und Source bilden den Ein- oder Ausgang dieses Kanals (s. Abbildung 3). Der Gate Anschluss, der sich zu beiden Seiten befindet, ist mit dem komplementär dotiertem Material angebracht, d.h. handelt es sich um eine n-dotierte Halbleiterschicht bestehen die Gate Anschlüsse zu beiden Seiten aus p-dotiertem Material.

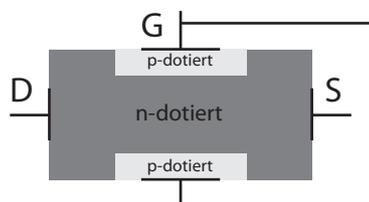


Abb. 3: Aufbau des Feldeffekttransistors

Funktionsweise

Ohne das Gate würde die n-dotierte Schicht einen ohmschen Widerstand darstellen, durch den der Strom fließt (von Drain zu Source). Durch Anlegen einer negativen Spannung an die Gate Anschlüsse werden die positiven Elektronen der P-Schicht in Richtung Anschluss angezogen. Folglich entsteht am Übergang des p-dotiertem Bereiches zum Halbleiterkanal eine Sperrschicht mit einem verbundenen Ladungsträgermangel. Daraus resultiert die Entstehung eines elektrischen Feldes welches den Querschnitt der Halbleiterschicht verkleinert. Durch diese Verengung des Kanals werden die Elektronen beim Durchfließen des Kanals behindert und ein geringerer Stromfluss stellt sich ein.¹⁶ Je negativer die Spannung am Gate Anschluss wird,

¹⁶ vgl. Sondergeld, <http://www.elektropla.net/grundlagen65.html> (Zugriff am 18.01.10)

desto geringer wird auch der Kanalquerschnitt, was durch die umgekehrte Proportionalität von Leiterquerschnitt zu Widerstand¹⁷ eine Erhöhung des ohmschen Widerstands mit sich bringt. Im Bereich des Drain Anschlusses ist das elektrische Feld größer als im Source Bereich. Dies liegt an dem Spannungsabfall über dem Halbleiterkanal. Am Source Anschluss ist immer ein geringeres Potential als am Drain Anschluss, weshalb das Potential von Drain zu Gate größer ist als das Gate zu Source Potential.

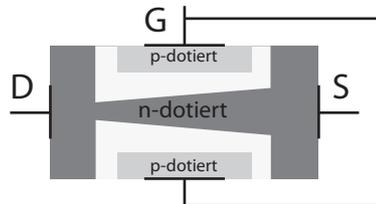


Abb. 4: Entstehung des elektrischen Feldes (hellgrau) eines Feldeffekttransistors

Da die Gate-Spannung nie größer als 0 V wird, fließt kein Gatestrom. Dies erklärt den bereits weiter oben erwähnten hohen Eingangswiderstand. Neben dem hohen Eingangswiderstand sind auch der größere lineare Eingangsspannungsbereich und die höheren Transitfrequenzen¹⁸ Eigenschaften die den Feldeffekttransistor in der Audiotechnik besonders beliebt machen.

2.2.3 Operationsverstärker

Der Operationsverstärker ist nichts anderes als eine Ansammlung mehrerer Transistoren (bipolar oder unipolar) die diskret, aus einzelnen Transistoren aufgebaut, komplizierteste Transistorschaltungen realisieren. Dies macht ihn zum wichtigsten Bauteil der gesamten analogen Elektronik und setzt ihn als Standard¹⁹ für Geräte in der Audiotechnik. Er gilt als nahezu ideales Verstärkerelement mit geringer Leistungsaufnahme, unendlich hoher Eingangsimpedanz und geringer, vernachlässigbarer Ausgangsimpedanz, unendlich hoher und frequenzunabhängiger Verstärkung und theoretisch keinem Rauschen. Die Idealen Bedingungen versucht der OP in der Realität zwar zu erreichen, aber lassen sich diese Vorgaben in der Praxis nur annähern. Durch Fertigungstoleranzen, Verschleiß des Halbleitermaterials oder der Festlegung einer maximalen Versorgungsspannung kommen diese Abweichungen vom idealen Verhalten zustande. In der Realität weist der OP eine endliche Eingangsimpedanz von $>100\text{M}\Omega$ auf, was immer noch ein sehr guter Wert ist, während der Ausgangswiderstand immer hin nur zwischen 10 und 1000 Ω beträgt. Dies zieht auch eine Begrenzung des Ausgangsstroms mit

¹⁷ $R = (\rho \cdot l) / q$ aus Brechmann et al. (2002), S.49; (Elektrische Leitfähigkeit * Leiterlänge) / Querschnittsfläche

¹⁸ vgl. Skritek (1988), S.88; Obergrenze, ab wann keine Verstärkung mehr stattfindet

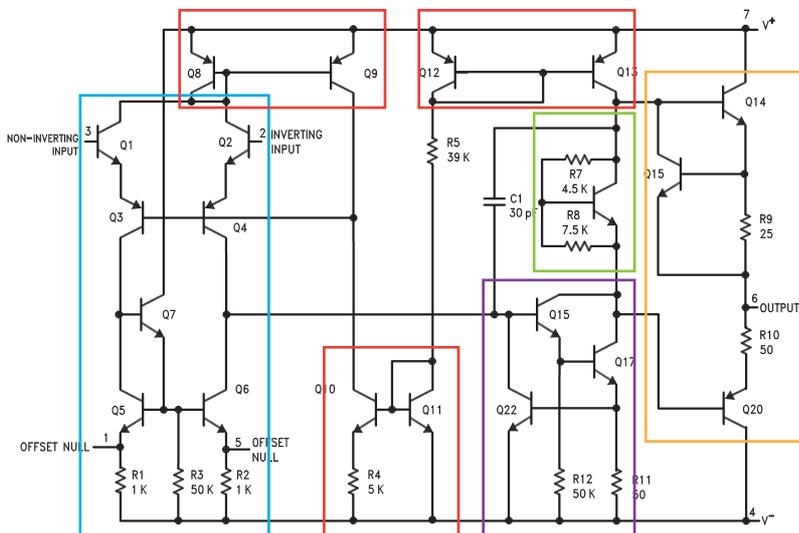
¹⁹ vgl. Friesecke (2007), S.263

sich. Die Verstärkung ist in der Praxis frequenzabhängig und zeigt ein Tiefpaß-Verhalten, sinkt also mit steigender Frequenz.²⁰

Trotz all dieser möglichen Abweichungen der realen Werte vom Idealfall bleibt der Operationsverstärker das Standardbauteil der Audiotechnik. Mit ihm lassen sich eine Menge verschiedener Rechenoperationen²¹ wie z.B. Verstärkung, Subtraktion, Addition und selbst komplizierteste Differentialgleichungen durchführen. Die durchführbaren Operationen entsprechen den Operationen eines linearen Systems (s. Kapitel 2.1), weshalb die Multiplikation und Division zweier Signale nicht möglich ist.

Aufbau und Bestandteile

Als Eingangsstufe und zentrales Element eines OPs steht ein Differenzverstärker (Q1, Q2, Q3 & Q4). Seine beiden Eingänge entsprechen dem invertierenden (plus Zeichen am Eingang) und nicht-invertierenden (minus Zeichen am Eingang) Eingang des OPs. Des Weiteren besteht der innere Aufbau aus mehreren Stromquellen und Verstärkerstufen. Am Ausgang besitzt die Schaltung eine Gegentaktendstufe²² (Q14, R9, R10, Q20). Sie setzt den Ausgangswiderstand herunter, damit ein hoher Ausgangsstrom erzielt werden kann, ohne dass das Signal zusammenbricht. Je nach Eingangspotential der Stufe wird der obere oder der untere Transistor leitend während der andere Transistor sperrt.



blau = Eingangsstufe
(Differenzverstärker), rot = Stromquellen
für Verstärkerstufen, violett =
Spannungsverstärkerstufe, grün =
Spannungserzeugung für
Ausgangsstufe, orange =
Gegentaktendstufe²³

Abb. 5: Innere Aufbau des Operationsverstärker

²⁰ Daten aus Unterlagen zum Praktikum Elektronik 1, Versuch: Operationsverstärker, Prof. Andreas Koch, Hochschule der Medien Stuttgart (2009), S.4

²¹ vgl. Friesecke (2007), S. 263

²² vgl. Ebner (2004), S. 156

²³ s. <http://www.elektro.de/lexikon.html?article=Operationsverst%C3%A4rker>, Kapitel 4.1.1 Innenaufbau (Zugriff am 19.01.10)

Funktionsweise

Der Differenzverstärker²⁴ des Operationsverstärkers hat die Funktion die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Eingängen zu verstärken, entspricht daher der primären Funktion des Operationsverstärkers. Je nachdem ob die Spannung am invertierenden oder nicht invertierenden Eingang größer ist wird die Ausgangsspannung positiv oder negativ. Sollten beide Spannungen an den Eingängen gleich groß sein bleibt der Ausgangswert des Operationsverstärkers auf seinem vorherigen Wert stehen.

Als wichtig erachtet sich beim Operationsverstärker die Rückkopplung, auch genannt Gegenkopplung. Die Gegenkopplung begrenzt die maximale Gesamtverstärkung durch die teilweise Rückführung des Ausgangs auf den invertierenden Eingang. Die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Eingängen wird dadurch auf null gehalten. Das Eingangssignal wird „kleiner“ und die Verstärkung nimmt ab. Ohne diese Begrenzung der Verstärkung wäre der OP zu empfindlich. So ist die Spannungsverstärkung nur noch von der äußeren Beschaltung des OPs abhängig.²⁵ Je nach Rückkopplungsart lassen sich verschiedenen Funktionen erfüllen:

- Invertierender Verstärker: Bei dieser Schaltungsart liegt der nicht invertierende Eingang auf Masse. Da der OP bestrebt ist das die Differenz zwischen den Eingängen immer null ist, erzeugt er am invertierenden Eingang eine virtuelle Masse (zwischen R_1 und R_2). Durch die hochohmige Eingangsimpedanz kann in den Eingang kein Strom fließen. Folglich fließt der Strom I_{R_1} durch R_2 an den Ausgang zurück und ruft an R_2 eine Spannung hervor, die mit der Ausgangsspannung identisch ist. Daraus resultiert immer eine um 180° phasenverschobene Spannung am Ausgang, weil der Strom nur von + nach - fließen kann.²⁶

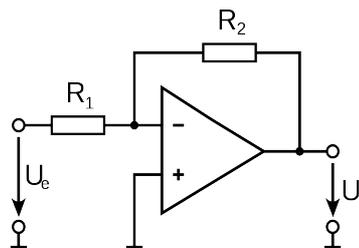


Abb. 6: Invertierender Verstärker

- Impedanzwandler: Der Impedanzwandler ist ein in der Audiotechnik häufig verwendeter Schaltungsaufbau des Operationsverstärkers. Mit ihm lassen sich die Impedanzen von Geräten anpassen damit z.B. ein niederohmiger Verbraucher an eine hochohmige Spannungsquelle angeschlossen werden kann. So wird die hochohmige Spannungsquelle

²⁴ vgl. Friesecke (2007), S. 263

²⁵ vgl. Unterlagen zum Praktikum Elektronik 1, Versuch: Operationsverstärker, Prof. Andreas Koch, Hochschule der Medien Stuttgart (2009), S.5

²⁶ vgl. Caspari (2010), <http://www.elektronikinfo.de/strom/operationsverstaerker.htm> (Zugriff am 19.01.10)

nicht belastet. Das Eingangssignal liegt an den hochohmigen nicht invertierenden Eingang, während der niederohmige Ausgang ohne Widerstand an den invertierenden Eingang zurückgekoppelt ist.

Weitere Funktionen des Operationsverstärkers sind der nicht-invertierende Verstärker, Differenzierer (Hochpass), Integrierer (Tiefpass), Differenz- und Summierverstärker oder der Komparator. Obwohl der Operationsverstärker als Hauptbauelement in der Audiotechnik gilt, arbeitet er im Kleinsignalbereich am linearsten. Im Großsignalverhalten machen sich bei Aussteuerung nichtlineare Übertragungseigenschaften bemerkbar.²⁷

2.3 Fehlerquellen und Nachteile der Analogtechnik

Die bereits oft erwähnten Verzerrungen sind nicht die einzigen Merkmale die in der Analogtechnik für eine Verschlechterung der Signalqualität stehen. Hervorgerufen werden diese alle durch die Bauteile selbst oder durch Einwirkung von aussen. Bauteile altern mit der Zeit, was in einer Veränderung ihrer Wertgenauigkeit resultiert und ihre Linearität, zumindest bei passiven Bauelementen, abzuweichen beginnt. Störungen und Verzerrungen sind die Folge. Aber wie man auch bei der Funktionsbeschreibung der Röhre schon gesehen hat können kapazitive und induktive Kopplungen zwischen den Bauteilen entstehen, was sich auch nachhaltig auf die Störanfälligkeit der Signale auswirkt. Jedoch ist für die Toningenieure das Rauschen der Bauteile, welches sich je nach Schaltungsaufwand aufsummiert das größte Problem. Die komplette analoge Studioteknik besteht aus komplexen Zusammenschaltungen vieler einzelner Bauteile von denen die größten auch diejenigen sind, die den Klang am meisten beeinflussen. Röhren, Feldeffekttransistoren und Operationsverstärker als Hauptelement der klanglichen Signalverarbeitung verarbeiten primär größere und vor allem viel mehr Signale als die Standardbauelemente wie Widerstände und Dioden. Eine mit der Zeit steigende Belastung, die in einer Abnutzung und großen Energieaufnahme resultiert ist die Folge davon. Störsignale haben zusätzlich eine expandierende Wirkung auf das Signal, denn hier liegt die Klangbeeinflussung. Die Quelle für eine Entwicklung der Störsignale ist daher in diesen Bauteilen hoch, aber wie dies genau abhängig ist zeigt sich im nächsten Kapitel.

²⁷ vgl. Skritek (1988), S.104

3. Rauschen

Rauschen hat viele verschiedene Definitionen die immer der Interpretation des gewünschten Anwendungsbereich entsprechen. In der Philosophie ist das Rauschen z.B. das Zeichen des Lebens.²⁸ In einem Ort vollkommender Stille ist selbst die Stille nicht still. Ein durch den Blutkreislauf und den Körper hervorgerufenen Rauschen ist immer existent. In der Akustik verbindet man mit dem Rauschen zweierlei. Einerseits steht es als das Störsignal, das gewünschte musikalische Information verdeckt, aber auch eine Verbindung mit einem akustischen Klang, wie das Meeres- oder dem Waldrauschen, wird mit ihm assoziiert. Als ein vorwiegend nachrichtentechnisches Problem das überall dort auftritt, wo Signale verarbeitet werden, eignet sich die Betrachtung auf der physikalischen Ebene und daher der Mathematik jedoch am besten. Das Rauschen ist hier allgegenwärtig.²⁹ Selbst in der Digitaltechnik lässt es sich nicht vollends beseitigen und heißt es durch Schaltungsoptimierungen dies zu beseitigen.

3.1 Was ist Rauschen? Eine Definition und Erklärung von Rauschen

Einfach gesagt ist Rauschen ein stochastisches Signal, also ein reines Zufallssignal. Ein Moment in dem alle wahrnehmbaren Frequenzen mit unterschiedlichen Amplituden auf einmal vorkommen und sich akustisch überlagern. Es herrscht das reinste „Chaos“. Für einen gewissen Zeitpunkt ist die Frequenz und dessen Amplitude nicht vorhersehbar. Egal wann man ein solches Signal messen würde, die Wahrscheinlichkeit bei derselben Frequenz dieselbe Amplitude wieder zu messen ist theoretisch unmöglich. Jedoch lässt sich die statistische Verteilung auftretender Frequenzen und die Verteilung der Spannungswerte (Amplituden) feststellen. Ausgelöst wird Rauschen immer bei einer Schwankung die sich um einen festen Wert herum ergibt. Eine Schwankung birgt eine unregelmässige Abweichung in sich die nicht vorausgesagt werden kann und daher statistisch schwankt. Deshalb gestaltet sich die genaue Beschreibung und Definition des Rauschens als schwierig. Eine Betrachtung in den nächsten beiden Unterkapiteln wie das Rauschen im Zeit- und Frequenzbereich definiert wird soll eine Charakterisierung zulassen.

²⁸ Baumann (1995), S. 28

²⁹ vgl. Fachartikel HAMEG Instruments, S.2

3.1.1 Stochastische Verteilung

Wie schon erwähnt lässt sich Rauschen schwer messtechnisch beschreiben da es auf zufälligen Vorgängen basiert. Vor allem im Zeitbereich scheint es fast unmöglich bekräftigende Aussagen über das Rauschen zu treffen. Jedoch können durch bestimmte Annahmen Wahrscheinlichkeitsaussagen, also statistische Angaben, über das Rauschverhalten im Zeitbereich getroffen werden. So lässt sich z.B. eine Annäherung des Effektivwerts feststellen und auch die Amplitudencharakteristik lässt sich näher beschreiben. Im Zeitbereich weisen die auftretenden Werte der Amplituden eine Gaußsche Verteilung auf, wodurch eine Aussage über die Momentanwerte der Amplitude definiert werden kann.³⁰ Die Verteilung dieser Werte wird anhand der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion³¹

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad [3/1]$$

beschrieben, genannt Gaußsche Glocke. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an mit welcher Signalamplitude ein bestimmtes Rauschsignal vertreten ist. Man sagt das Rauschen ist gaußverteilt.

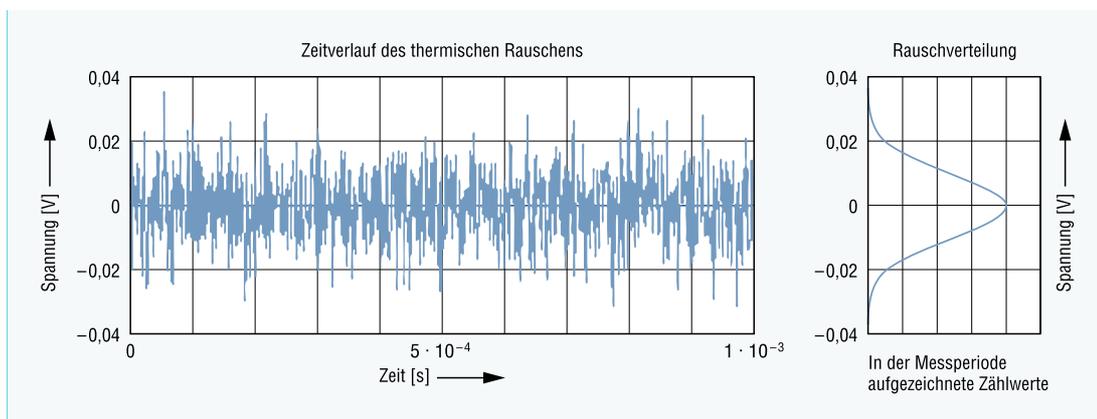


Abb. 7: Gaußverteilung des stochastischen Rauschsignals

Da die Wahrscheinlichkeit für kleinere Amplituden höher ist als die für große Amplituden (größere „Rauschspitzen“ treten selten auf)³² werden die Momentanwerte der Amplitude sich meistens im Bereich von null, also dem Mittelwert, aufhalten (siehe Gaußsche Glocke in Abb. 7). Seltener im Bereich von null bis 0,02 (-0,02 bis null) und noch seltener im Bereich von 0,02 bis 0,04 (-0,02 bis -0,04). Null, auch genannt μ , ist der Mittelwert der Rauschgröße $U(t)$ und über eine

³⁰ vgl. Fachartikel HAMEG Instruments (2009), S.5, Intervall $[0,02, -0,02]$ aus der Grafik steht für das Intervall $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ und Intervall $[0,04, -0,04]$ aus der Grafik steht für das Intervall $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$

³¹ nach Berberich / Kay (2007), Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen Teil 1, S.53, x: Zufallsvariable (Rauschspannung), μ : Mittelwert, σ : Standardabweichung

³² s. László Palotas (2003), S.190

längere Zeit gesehen ist dieser Wert gleich Null, da sich die Schwankungen um den Mittelwert gegenseitig aufheben. Deshalb wird der Effektivwert zur Beschreibung des Rauschsignals herangezogen. Dieser wird durch das Schwankungsquadrat (gleich dem zeitlichen Mittelwert der quadratischen Rauschgröße)³³

$$\overline{U(t)^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [U(t)]^2 dt \quad [3/2]$$

gebildet und entspricht der Standardabweichung σ .

Durch Integration der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion [3/1] erhält man die Wahrscheinlichkeitsfunktion³⁴ P die voraussagt ob ein Wert x in ein definiertes Intervall fällt.

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b \varphi(x) dx \quad [3/3]$$

In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies (bei μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung) das:

- 68,3 % aller Messwerte im Intervall $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ liegen
- 95,5 % aller Messwerte im Intervall $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ liegen
- 99,7 % aller Messwerte im Intervall $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ liegen³⁵

Daraus folgt das lediglich 0,3 % aller Werte sich außerhalb des Bereiches $\pm 3\sigma$ befinden. Die Aussage dass es genügt den Spitze-Spitze-Wert der Rauschspannung mit dem Wert 6σ abzuschätzen kann deshalb getroffen werden.³⁶ Dies ist der Grund, weshalb man von einer konstanten Leistungsdichte über einen gewählten Frequenzbereich (hier das Intervall $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$) spricht, da fast alle Werte in diesen Bereich fallen.

3.1.2 Rauschen im Frequenzbereich

Zur Beschreibung des Rauschens eignet sich die Darstellung im Frequenzbereich besser, da das Rauschen hier genauer beschrieben und berechnet werden kann. Im Zeitbereich ist das Rauschen ein Zufallssignal, auch genannt Schwankungsgröße, weshalb keine Aussage über dessen Zeitfunktion getroffen werden kann. Der zeitliche Verlauf des Rauschsignals ist unbekannt und entspricht keiner Regelmässigkeit. Sofern aber ein Funktionswert zu einer bestimmten Zeit t_1 bekannt ist kann eine Wahrscheinlichkeitsaussage für den Zeitpunkt $t_2 = t_1 +$

³³ vgl. Müller (1990), S.21

³⁴ vgl. Berberich / Kay (2007), Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen Teil 1, S.54

³⁵ s. Papula (2006), S.292

³⁶ Berberich / Kay (2007), Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen Teil 1, S.54

τ getroffen werden (τ = zeitliche Verschiebung). Dadurch lässt sich feststellen inwieweit die beiden Zufallssignale zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 miteinander korrelieren, d.h. wie diese beiden Werte der differentiellen Zeitpunkte sich voneinander unterscheiden und daher ihre Beziehung zueinander ist. Die Funktion wird mit sich selbst korreliert. Diesen Vorgang beschreibt die Autokorrelationsfunktion³⁷ $\rho(\tau)$.

Trotz der unbekanntenen Zeitfunktion des Rauschsignals lässt sich laut dem Wiener-Khintchine Theorem³⁸ durch Fouriertransformation der Autokorrelationsfunktion in den Frequenzbereich das Leistungsspektrum $W(f)$

$$W(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\tau) * e^{-j\omega\tau} d\tau \quad [3/4]$$

bilden und eine Aussage über die Rauschenergie treffen. Durch inverse Fouriertransformation der spektralen Leistungsdichte erhält man wieder die Autokorrelationsfunktion des Zeitsignals

$$\rho(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(f) * e^{+j\omega\tau} df \quad [3/5]$$

Setzt man $\tau = 0$ so erhält man die Beziehung

$$P_x = \rho(0) = a^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} W(f) df \quad [3/6]$$

und erkennt, dass die gesamte Rauschleistung a^2 dem Integral über den gesamten Frequenzbereich entspricht.³⁹ Die Definition des Rauschens findet im Frequenzbereich daher über die spektrale Leistungsdichte $W(f)$ statt, der Leistung die das Rauschen in einem definiertem Frequenzband umsetzt.⁴⁰ Anders ausgedrückt entspricht die umgesetzte Energie des Rauschens über einer gewissen Bandbreite dem Integral der Leistungsdichte

$$\int_0^{\infty} W(f) df = a^2 \quad [3/7]$$

und ist ein Beweis für die Frequenzunabhängigkeit der Leistung, da über den kompletten Frequenzbereich integriert wird.

³⁷ s. Müller (1990), S. 26

³⁸ vgl. Müller (1990), S. 44; Das Wiener-Khintchine-Theorem besagt, dass die spektrale Leistungsdichte eines stationären Zufallsprozess die Fouriertransformierte der zugehörigen Autokorrelationsfunktion ist.

³⁹ Formeln in Anlehnung an Müller (1990), S. 43ff

⁴⁰ vgl. Müller (1990), S. 42, Im Gegensatz zum Schwankungsquadrat, welches die gesamte Leistung eines Rauschvorgangs beschreibt.

Neben der spektralen Leistungsdichte definiert sich das Rauschen im Frequenzbereich, wie auch schon im Zeitbereich, über den Effektivwert. Während im Zeitbereich immer das Quadrat des Effektivwerts gebildet wird (ergibt sich aus der Beziehung der Leistung zum Spannungsquadrat), entspricht der Effektivwert⁴¹ im Spektrum der Wurzel aus der Fläche der umgesetzten Leistung.

$$U_R \equiv \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} W(f) df}$$

[3/8]

3.2 Arten von Rauschen

Wie sich zeigte definiert sich das Rauschen durch die umgesetzte Energie in einem definierten Frequenzband. Mit dieser Beschreibung lässt sich durch die nähere Betrachtung das Rauschen kategorisieren, da nicht alle Störungen im selben Frequenzband anfallen. Abbildung 8 zeigt die Erkenntnis auf, dass in den tiefen Frequenzbereichen die Leistung einem unterproportionalen Verhältnis entspricht, also mit steigender Frequenz abfällt. In dieser Ebene ist das Rauschsignal relativ korreliert, da seine Werte ähnlich zu dem vorangegangenen Wert sind. Diese geringere Veränderung bewirkt einen Abfall der Energie, da immer eine unterschiedliche Energie in jeder Frequenz umgesetzt werden. Im Kontrast dazu sind die Werte des als, in Abbildung 8, betitelte weiße Spektrum unterschiedlich von vorangegangenen und nachfolgenden Werten und daher unkorreliert. Die Sprünge zwischen zeitlich benachbarten Werten sind beliebig groß. Dadurch ergibt sich dieselbe Energie bei jeder Frequenz und ein konstantes Spektrum als Resultat. Die spektrale Verteilung der Energie ist das primäre Unterscheidungsmerkmal verschiedener Rauscharten und bildet zusätzlich ein Maß für die Wahrnehmung da eine Aussage über die Energieverteilung bestimmter Frequenzbereiche getroffen werden kann.

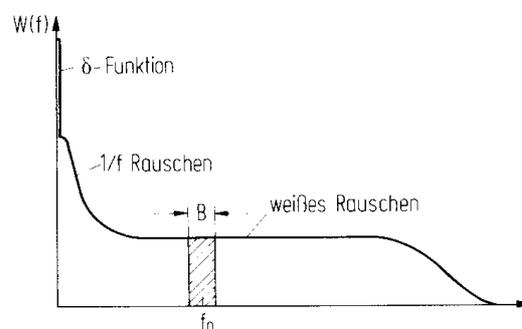


Abb. 8: Spektrum des Rauschens im Frequenzbereich

⁴¹ nach Skritek (1988), S. 54

3.2.1 Thermisches Rauschen

Thermisches Rauschen ist die am Häufigsten auftretende Art des Rauschens und wird neben Wärmerauschen auch noch als Widerstandsrauschen, Nyquist-Rauschen, Johnson-Rauschen oder Johnson-Nyquist-Rauschen betitelt. Hervorgerufen wird es durch die ungeordnete Bewegung der Ladungsträger, „random walks“⁴², in Leitern als Folge ihrer Erwärmung. Je mehr die Temperatur ansteigt, desto größer wird auch die Bewegung der Teilchen und folglich das Rauschen. Die Bewegung ruft an den Enden des Leiters eine statistisch schwankende Aufladung hervor, die als Rauschspannung oder -Strom resultiert.⁴³ Der Effektivwert⁴⁴ dieser entstehenden Spannung lässt sich mit der Formel

$$U_R = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad [3/9]$$

ermitteln. Dabei ist es irrelevant ob der Leiter sich im Leerlauf, d.h. im Spannungsfreien Zustand, oder im Kurzschluss befindet. Eine Rauschleistung ist immer vorhanden. Die spektrale Leistungsdichte bildet dazu wieder das passende Pendant mit der Formel

$$W(f) = 4kTR \quad [3/10]$$

Die auftretende Amplitudencharakteristik entspricht auch hier einer Gaußverteilung, wodurch eine Frequenzunabhängigkeit der umgesetzten Rauschenergie resultiert und das Spektrum konstant ist. Bei allen Frequenzen tritt dieselbe Energie auf weshalb es auch Breitbandrauschen⁴⁵ genannt wird. Durch das gaußverteilte Rauschen beträgt der Mittelwert der Spannung, über einen längeren Zeitraum gesehen, gleich Null, weshalb der Effektivwert als Beschreibung zur umgesetzten Energie wieder herangezogen wird.

Der Effekt des thermischen Rauschens tritt nicht nur in ohmschen Widerständen auf, sondern in allen Bauteilen. Jedes Bauteil weist einen gewissen Widerstand auf, seien es Blindwiderstände oder auch Verlustwiderstände. Folglich rauscht theoretisch jedes Bauteil. Aber dieses Rauschen bildet nur einen geringen Teil des Gesamten, in einem Bauteil entstehenden, Rauschen.

⁴² Höldrich (1995), S. 135

⁴³ vgl. Müller (1990), S.50

⁴⁴ s. Skritek (1988), S.57, k = Boltzmannkonstante $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K, T : Temperatur, R : Widerstand

⁴⁵ vgl. Berberich / Kay (2007), Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen Teil 2, S.33

3.2.2 Schrotrauschen

Wird an ein Halbleiterbauteil nun Strom angelegt resultiert ein Schrotrauschen. Im Gegensatz zum Thermischen Rauschen, das also im Leerlauf eines Leiters auftritt, kommt das Schrotrauschen nur in stromdurchflossenen Leitern vor.

Kurz gesagt entspricht Schrotrauschen statistischen Schwankungen die durch einen ungleichmäßigen Ladungstransport hervorgerufen werden. Es tritt auf wenn die Elektronen auf ihrem Weg durch einen Leiter von ihrer „Marschroute“ abweichen müssen um ein „Hindernis“ zu überwinden. Ein solches Hindernis ist ein Potentialunterschied und wäre zum Beispiel der PN-Übergang einer Diode. Hier müssen die Elektronen kinetische Energie aufbringen um die Sperrschicht zu überwinden. Jedoch muss dies jedes Elektron für sich allein und zu unterschiedlichen Zeitpunkten bewerkstelligen, wodurch sich eine statistische Schwankung des Stromfluss um einen Mittelwert einstellt. Normalerweise fließen die Elektronen mit einer Ordnung durch einen Leiter und haben einen konstanten Stromfluss.⁴⁶ Hier schwankt die Ladungsmenge pro Zeit die durch ein Bauteil fließt, was gleichbedeutend mit der Schwankung der Stromstärke ist. Ein Rauschen entsteht.

Wie auch beim thermischen Rauschen hat das Schrotrauschen eine konstante Leistungsdichte über den gesamten Frequenzbereich. Jedoch unterscheidet es sich von diesem dass es durch einen Stromfluss entsteht. Das wiederum heißt aber auch dass es durch Reduzierung des Stromes durch ein Bauteil vermindert werden kann. Der Effektivwert⁴⁷ des Rauschstromes beträgt hier

$$i_{\text{eff}} = \sqrt{2eI_0 \Delta f}$$

[3/11].

3.2.3 1/f-Rauschen

In Abbildung 8 war zu sehen, dass nicht alle Rauscharten sich über den kompletten Frequenzbereich erstrecken. Es gibt auch Arten bei denen sich die spektrale Leistungsdichte auf einen bestimmten Frequenzbereich bezieht. Beim so genannten 1/f-Rauschen fällt die Leistungsdichte ab einer Eckfrequenz logarithmisch ab. Mit anderen Worten sinkt die Leistungsdichte umgekehrt proportional mit der Frequenz, wird also mit steigender Frequenz kleiner. Zurück zuführen ist die Ursache auf viele verschiedene Parameter, wobei hauptsächlich die Oberflächenbeschaffenheit von Halbleitern und die Qualität und zeitliche Abnutzung der

⁴⁶ vgl. Fachartikel HAMEG Instruments, S.4

⁴⁷ s. Müller (1990), S. 66

Bauteile ausschlaggebend ist. Dieses Rauschen tritt auch nur bei Halbleitern auf.⁴⁸ Jedoch wurde es wissenschaftlich noch nicht so weit untersucht um genauere Aussagen darüber machen zu können.

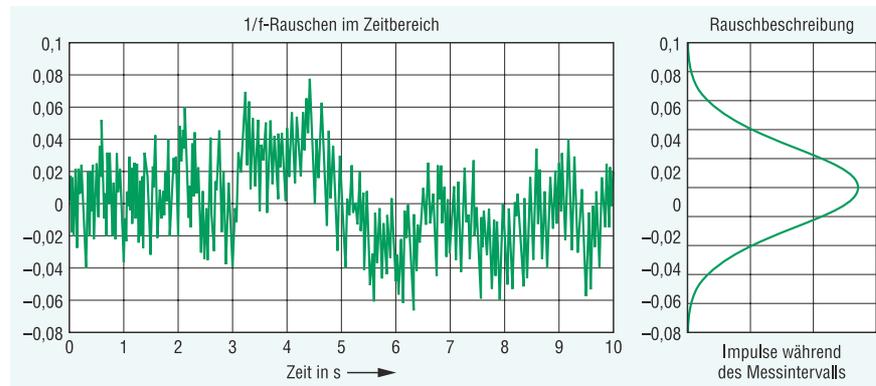


Abb. 9: 1/f Rauschen bei zeitlicher und statistischer Betrachtung

Trotz der Begrenzung und dem Abfall des Leistungsspektrum weist auch das 1/f-Rauschen eine Normalverteilung der Amplitude auf und kann deshalb auf den bereits in Kapitel 3.1.1 aufgezeigten Weg beschrieben werden.⁴⁹

Laut [3/6] wird die Leistung in einem definierten Frequenzintervall $[f_1, f_2]$ mit der Formel

$$P = \int_{f_1}^{f_2} W(f) df \quad [3/12]$$

berechnet. Bei einem 1/f-Rauschen fällt die Leistung mit der Frequenz ab, daraus ergibt sich mit $W(f) = c/f$ gleich folgende Leistung⁵⁰

$$P = \int_{f_1}^{f_2} \frac{c}{f} df = c * \ln(f_2 / f_1) \quad [3/13].$$

Dabei wird auch der Beweis geliefert das die Leistung in einem bestimmten Frequenzintervall frequenzunabhängig ist. Ein solches Frequenzintervall kann zum Beispiel eine Oktave sein.

3.2.4 Funkelrauschen

Das Funkelrauschen ist vergleichbar mit dem 1/f-Rauschen, die Leistungsdichte fällt auch hier mit steigender Frequenz ab. Jedoch ist diese Leistungsabnahme viel stärker, nämlich

⁴⁸ ebd., S. 86

⁴⁹ vgl. Berberich / Kay (2007), Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen Teil 2, S. 33

⁵⁰ s. Müller (1990), S. 87, Formel $P = c * \ln(f_2/f_1)$ ist die Ableitung des Integrals.

umgekehrt proportional mit dem Quadrat der Frequenz, d.h. $1/f^2$. Daher tritt auch das Funkelrauschen bei tiefen Frequenzen noch stärker als das $1/f$ -Rauschen auf.

Wie das $1/f$ -Rauschen ist auch das Funkelrauschen ein von der Qualität der betroffenen Bauteile hervorgerufenes Rauschen und ist ein in Halbleitermaterialien und in Elektronenröhren vorwiegend vorkommendes Rauschphänomen. Ausgelöst wird es durch die statistischen Schwankung des Stromes bei der Emission von Elektronen, da diese nie zur selben Zeit auf der Leiterplatte auftreffen. Aber erklärt dies auch das Auftreten in den tiefen Frequenzbereichen. Denn mit steigender Frequenz und der daraus resultierenden äquivalenten vermehrten Anzahl von Elektronen, werden die zeitlichen Schwankungen der auftreffenden Elektronen wesentlich kleiner bis komplett irrelevant. Eine Berechnung des Funkelrauschens ist jedoch bisweilen nicht möglich. Lediglich die Angabe des Rauschen aus den Datenblättern der Bauteile steht dem Nutzer zur Verfügung.⁵¹

3.2.5 Generations-Rekombinations-Rauschen

Bei Halbleitern, insbesondere bei bipolaren Transistoren und Dioden, springen die Elektronen ständig zwischen Valenz- und Leitungsband⁵² hin und her (P- und N-Schicht). Dadurch hinterlassen sie in dem Band von dem sie kommen ein Loch, d.h. Ladungsträger verschwinden (Rekombination), während im ankommenden Band neue Ladungsträger entstehen (Generation). Da die Anzahl der Löcher und Elektronen nie konstant bleibt weil es mal mehr Löcher als freie Ladungsträger geben kann, schwankt diese Zahl über der Zeit wodurch auch der Strom durch den Halbleiter schwankt und ein Rauschen hervorruft.

3.2.6 Stromrauschen

Wird an einen ohmschen Widerstand Strom angeschlossen entsteht neben dem thermischen Rauschen ein Stromrauschen⁵³. Dieses kommt vor allem in stromdurchflossenen Kohleschichtwiderständen vor und ist vergleichbar mit dem Schrotrauschen, d.h. die Elektronen müssen Potenzialbarrieren überwinden. Jedoch spielt hier die Qualität und die Technologie der Widerstandsschichten die entscheidende Rolle. Diese spiegeln sich in der Zusammensetzung der Widerstandsschichten wieder, bei denen winzige Potentialunterschiede herrschen, die aber ausreichend für eine statistische Schwankung und daher Rauschen sind.

⁵¹ vgl. Fachartikel HAMEG Instruments, S.4

⁵² vgl. Müller (1990), S. 70f

⁵³ vgl. Fachartikel HAMEG Instruments, S.4

3.3 Rauschen der Bauteile

Nach der bekannten Funktion der einzelnen Bauteile und den möglichen Rauscharten die auftreten können, ist es nun interessant zu wissen welches Rauschen bei bestimmten Bauteilen resultiert. Anhand dieser Zusammensetzung lässt sich das Rauschspektrum eines audiotecnischen Systems durch seinen inneren Aufbau charakterisieren. Zum Beschreiben des Rauschverhalten einzelner Bauteile eignet sich besonders die Darstellung der Rauschquellen als Ersatzschaltbilder.

3.3.1 Rauschen bei Widerständen

Der Widerstand ist das Basiselement jeder elektronischen Schaltung. Durch sein häufiges Auftreten in Schaltungen ist es natürlich sinnvoll zu wissen mit welchem Rauschanteil und welchen Rauscharten er sich zum Gesamtrauschen eines audiotecnischen Systems addiert.

Die bei Widerständen häufigste auftretende Rauschart ist das thermische Rauschen und bildet gleichzeitig auch das minimale Rauschen elektronischer Schaltungen. Dieser minimale Rauschteppich, hervorgerufen durch die Molekularbewegung, ist immer vorhanden, da er schon im stromlosen Zustand entsteht, erhöht sich jedoch auch mit steigender Temperatur. Das Ersatzschaltbild der Rauschquelle zeigt die auftretende Rauschspannung U_0 anhand eines rauschfreien Widerstands und einer Rauschspannungsquelle. Äquivalent kann auch das Schaltbild aus dem Leitwert eines rauschfreien Widerstands und einer Rauschstromquelle dargestellt werden.⁵⁴ Dabei entspricht der Effektivwert laut [3/9] $U_0 = \sqrt{4kTR\Delta f}$ und $I_0 = \sqrt{4kTG\Delta f}$.

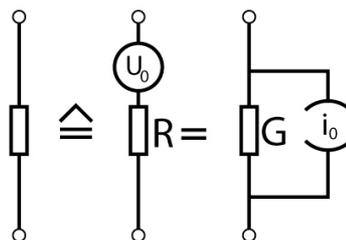


Abb. 10: Ersatzschaltbild eines rauschenden Widerstandes

Neben dem thermischen Rauschen tritt auch das Stromrauschen in stromdurchflossenen Widerständen auf. Es ergibt sich eine statistische Schwankung des Stromes, also ein Rauschen, da die Elektronen nicht geordnet und nicht immer in gleicher Anzahl aus dem Widerstand „austreten“.⁵⁵

⁵⁴ vgl. Palotas (2003), S. 196

⁵⁵ vgl. Caspari (2010), <http://www.elektronikinfo.de/strom/widerstandsrauschen.htm#WeitereRauschquellen> (Zugriff am 22.01.10)

3.3.2 Rauschen bei Röhren

Auch bei der Röhre entsteht ein Rauschen aufgrund eines ungleichmäßigen Ladungstransports. Die Menge der Elektronen die auf die Anode auftreffen ist zwar über eine längere Zeit gesehen wieder konstant, doch für momentane Werte schwankt der Wert um einen Mittelwert. Dieser Effekt ist charakteristisch für das Schrotrauschen.⁵⁶

In der Röhre passieren viele chemische Vorgänge auf einmal, so auch die Erwärmung. Nachteil ist das mit der Zeit die Kathode, auf der die Elektronen erzeugt werden, sich abnutzt und sich daher die Oberflächenbeschaffenheit ändert. Zur Folge hat diesen einen ungleichmässig austretenden Elektronenstrom. Dadurch entsteht ein Funkelrauschen wodurch die Röhre im Niederfrequenzbereich stark rauscht. Dies macht auch den Hauptteil des Gesamtrauschens einer Röhre aus. Des Weiteren kommt es in der Röhre zu einem Verteilungsrauschen, weil nicht alle Elektronen das Schirmgitter mit gleicher Geschwindigkeit passieren.

3.3.3 Rauschen bei bipolaren Transistoren

Der Transistor als Halbleiterbauteil weist schon ein viel größeres Rauschen auf. Die typischen Halbleiterrauscharten wie Schrotrauschen und besonders das nur in Halbleitern auftretende Generation-Rekombinations-Rauschen treten hier verstärkt auf. Deshalb wird der Transistor in der Audiotechnik als stark rauschendes Bauteil angesehen.

Das Schrotrauschen bildet das stärkste Vertretende Rauschen in einem Transistor. Durch gleich zwei vorhandene PN-Übergänge müssen die Elektronen beim Durchfluss vom Emitter zum Kollektor (technische Stromrichtung) zwei Potentialbarrieren überwinden. Das Gesamtrauschen des Transistors wird durch diese zwei Faktoren erheblich verstärkt.

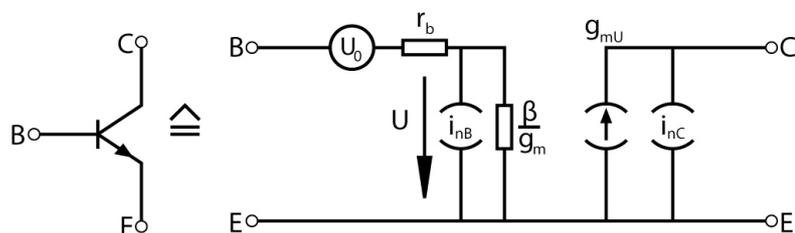


Abb. 11: Ersatzschaltbild eines rauschenden bipolaren Transistors

Das Ersatzschaltbild zeigt auf, dass durch den Basisbahnwiderstand r_B ein thermisches Rauschen resultiert und die zwei Schott-Rauschquellen i_{nB} und i_{nC} auftreten. Anstatt dem

⁵⁶ vgl. Caspari (2010), <http://www.elektronikinfo.de/strom/roehrenirrtum.htm#Rauschen> (Zugriff am 22.01.10)

Effektivwert des Schrotrauschen aus Gleichung [3/11] $i_{\text{eff}} = \sqrt{2eI_0\Delta f}$ ergeben sich für die beiden unkorrelierten Schrotrauschquellen folgende Beziehungen für deren Leistungsdichte:

$$- i_{nB}^2(f) = 2 * e * I_B \text{ und für deren Effektivwert des Stromes } i_{nB} = \sqrt{2eI_B\Delta f}$$

$$- i_{nC}^2(f) = 2 * e * I_C \text{ und für deren Effektivwert des Stromes } i_{nC} = \sqrt{2eI_C\Delta f}.$$

Durch die geometrische Addition der beiden Rauschströme ergibt sich ein viel höherer Wert als z.B. bei der Diode.⁵⁷

Da beim Transistor durch die Bewegung der Ladungsträger über die PN-Übergänge Ladungsschwankungen entstehen und dadurch die Spannung über der Basis-Emitter Strecke nicht konstant ist, werden die Rauschströme des Kollektor und der Basis jeweils noch mit einem Generation-Rekombinations-Rauschen (1/f-Rauschen) überlagert.⁵⁸ Dies spielt daher besonders im Niederfrequenzbereich eine große Rolle. Folglich beträgt das Rauschen eines bipolaren Transistors, besonders im Hinblick der Spannungsrauschquelle, im niederfrequenten Betrieb erheblich mehr als bei hohen Frequenzen.

3.3.4 Rauschen bei Feldeffekttransistoren

Effekt	J-FET	MOS-FET	MES-FET
1 Thermisches Rauschen	Kanal	Kanal	Kanal
2 Diffusionsrauschen (heiße Elektronen)	—	—	Kanal
3 Schrotrauschen	Sperrstrom Gate-Kanal	—	Sperrschicht Gate-Kanal
4 Gen.-Rek.-Rauschen (Ladungssteuerung) 1/f-Rauschen	RL-Zone	Isolator RL-Zone Grenzschicht HL-Isolator	RL-Zone
5 Thermisches Rauschen parasitärer Widerstände	Bahnwider- stand	Bahnwider- stand	Bahnwider- stand

Abb. 12: Rauscheffekte bei Feldeffekttransistoren

Anhand der Abbildung 12 lassen sich die einzeln vorkommenden Rauscharten des Feldeffekttransistors ausmachen. Der Anteil des Thermischen Rauschens ist im Gegensatz zum bipolaren Transistor wesentlich stärker vertreten, da es sich hierbei nicht um einen wirklichen Verlustwiderstand handelt, sondern der Kanal zwischen Drain und Source eine ohmschen Widerstand darstellt. Trotz alledem ist das thermische Rauschen nur der geringste Anteil am Gesamtrauschen des FETs.

Gegeben durch die Steuerung des Gates mit Elektronen kommt es zu einem Generations-Rekombinations-Rauschen, weil die Anzahl der „springenden“ Elektronen nie konstant bleibt.

⁵⁷ vgl. Skritek (1988), S. 59

⁵⁸ vgl. Müller (1990), S. 150

Kleine Schwankungen des Steuerstromes sind hierbei schon sehr wirksam. Dieses Rauschen äußert sich schon wie zuvor beim bipolaren Transistor als $1/f$ -Rauschen. Aber nicht nur die Anzahl der Ladungssprünge an den Halbleiterübergängen schwankt über der Zeit, sondern auch der Durchfluss der Elektronen durch den Kanal und das daraus resultierende Ein- und Austreten der Elektronen bildet keine konstante Größe und schwankt. Hervorgerufen wird dies durch die Verbindung der Anschlüsse mit dem Halbleitermaterial durch eine Potenzialbarriere. Ein wie bei allen Halbleitern auftretendes zusätzliches Schrotrauschen resultiert.

Obwohl der Feldeffekttransistor viele Rauschquellen vereint zählt er trotzdem zu den geringsten rauschenden Verstärkerbauteil, weshalb er in Audioschaltungen auch so beliebt ist.⁵⁹

3.3.5 Rauschen des Operationsverstärker

Im Gegensatz zu den anderen Bauelementen, bei denen die einzelnen Rauscharten separat aufgezeigt und beschrieben werden können, wird beim Operationsverstärker aufgrund der Komplexität das Rauschen zu zwei Kenngrößen, einem Stromrauschen und einem Spannungsrauschen, zusammengefasst und beschrieben. Diese beiden Größen sind repräsentativ für alle beinhaltende Rauschquellen. Die Spannungsrauschquelle U_R zwischen den beiden Eingängen und jeweils eine Rauschstromquelle am invertierenden- i_{n-} und nichtinvertierenden i_{n+} Eingang beschreiben alleinig das gesamte Rauschen im Inneren des Operationsverstärkers. Je nach Außenbeschaltung des OP addieren sich zusätzliche Rauschquellen mit auf.

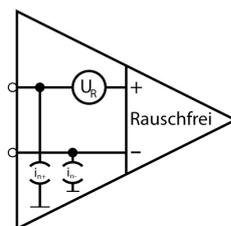


Abb. 13: Ersatzschaltbild eines rauschenden Operationsverstärker

Prinzipiell besteht das Rauschen eines Operationsverstärker aus der Überlagerung eines thermischen Rauschens mit einem $1/f$ -Rauschen, aber auch Effekte wie das Schrotrauschen sind daran beteiligt. Anhand des Diagramms aus den jeweiligen Datenblättern (Abb. 14 und 15) kann aus der Rauschspannungsdichte entnommen werden, dass das Rauschen zu tiefen Frequenzen hin stärker vertreten ist.⁶⁰

⁵⁹ vgl. Müller (1990), S. 161

⁶⁰ vgl. Caspari (2010), http://www.elektronikinfo.de/strom/op_rauschen.htm (Zugriff am 25.01.10)

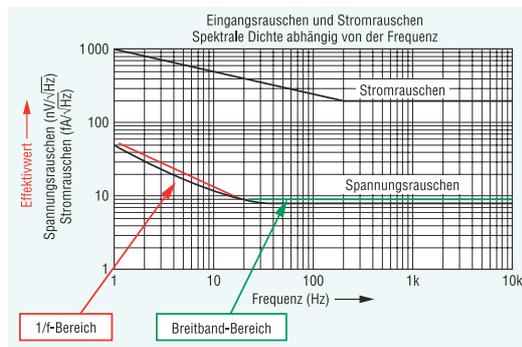


Abb. 14: Spektrale Dichte eines rauschenden OPs

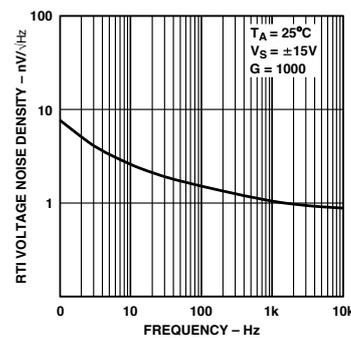


Abb. 15: Rauschspektrum des SSM2019

Die Übergangsfrequenz bei der das Rauschen vom Funkelrauschen (1/f-Bereich) zum Thermischen Rauschen wird (Breitbandbereich) nennt man Eckfrequenz.⁶¹ Mit dessen Wert aus den Datenblättern kann gezielt der geeignete OP für eine Audioanwendung ausgesucht werden. Bei einer Eckfrequenz von z.B. 100 Hz sind die Frequenzen unter 100 Hz viel stärker vertreten. Da aber in diesem Bereich die Wahrnehmung nicht so ausgeprägt ist wie im Hochtonbereich macht sich dieser Anstieg kaum bemerkbar und ist daher sinnvoller als ein Operationsverstärker mit einer höheren Eckfrequenz. Das Rauschverhalten hängt aber auch stark von der Realisierung des Operationsverstärkers ab. Beim Aufbau des internen Differenzverstärkers mit Feldeffekttransistoren ist das Stromrauschen wesentlich kleiner, während das Spannungsruschen höher ist. Genau andersrum verhält es sich bei der Schaltungsrealisierung mit bipolaren Transistoren.

3.4 Rauschen in der Digitaltechnik

Als ein ursprüngliches Phänomen der analogen Welt ist das Rauschen mit dem Aufkommen der Digitaltechnik nicht komplett verschwunden. Analog-Digital-Wandler die als Übertragungssystem von ihrem linearen Verhalten abweichen können Rauschen verursachen. Hauptursache sind hierbei die Rundungsfehler die bei der Digitalisierung analoger Signale entstehen. Die Einteilung der Amplitudenwerte bei der Digitalisierung sind durch einen fest definierten Bereich endlich. Deshalb kann es passieren, dass vom kontinuierlichen analogen Signal zwei Abtastwerte mit unterschiedlicher Originalamplitude in derselben „Stufe“ landen, d.h. denselben Bitwert bekommen. Oder auch die abgetasteten Werte nie genau auf den Grenzen der Stufen liegen. Dadurch entsteht immer eine geringe Abweichung vom eigentlichen Wert zum digitalisierten Ist-Wert. Ein meist hochfrequenteres Rauschen ist die Folge und die Äußerung der statistischen Schwankungen bei der Digitalisierung.

⁶¹ vgl. Berberich / Kay (2007), Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen Teil 2, S. 36

4. Wirkung und Wahrnehmung von Rauschen

4.1 Menschliche Wahrnehmung - Ein kurzer Überblick

Das menschliche Ohr ist ein komplexes Gebilde. Sehr faszinierend wie es auf Schalleindrücke der Umwelt agiert und diese verarbeitet. Es fungiert zum Beispiel als Fourier-Analysator mit der Fähigkeit die komplexesten Töne in ihre einzelnen Frequenzanteile zu zerlegen und ihre Grundtöne zu charakterisieren. Um jedoch zu verstehen wie das Gehör auf verschiedene Rauscheindrücke oder Schallwellen im allgemeinen reagiert ist es notwendig die psychoakustischen Effekte zu definieren, da diese bei der Aufnahme von den verschiedenen Rauschfarben äußerst relevant ist. Die Psychoakustik⁶² beschreibt den Zusammenhang zwischen denen auf physikalischer Ebene aufgenommenen Reize und den daraus resultierenden Wahrnehmungen und Empfindungen. Das Gehör bildet hierbei ein System bei dem die ankommenden Schalleindrücke einer kognitiven Signalverarbeitung zu Grunde liegen. Physikalische Schallwellen auf der Eingangsseite des Systems, lösen ausgangseitig unterschiedliche Empfindungen wie z.B. Tonhöhe, Klangfarbe, Schärfe und Lautheit aus. Man kann sagen, der Mensch wandelt physikalische Phänomene wie Amplitude und Frequenz in Korrelate Empfindungen um.

Nach Ellermeier und Hellbrück [2008, S.52] kann man die auftretenden Empfindungen in zwei Gruppen klassifizieren: Feste Grenzwerte von Empfindungen und unterschiedlich wahrgenommene Empfindungsgrößen.

Schwellen / Grenzwerte	Überschwellige Empfindungsgrößen
Hörschwelle	Lautstärke
Schmerzgrenze	Tonhöhe
Frequenzbereich	Klangfarbe

Tabelle 1: Klassifizierung auftretender Empfindungen

Die festen Grenzwerte von Empfindungen, bei Ellermeier & Hellbrück [2008, S.52] als Schwellen definiert, sind Werte ab denen bei jedem Mensch die Wahrnehmung beginnt. Dies sind zum einen die Hörschwelle, die Schmerzgrenze und der hörbare Frequenzbereich. Die Hörschwelle definiert den Moment, ab wann ein Schallereignis eine Empfindung auslöst. Im Gegensatz dazu beschreibt die Schmerzgrenze die Oberschwelle für eine Hörempfindung. Über der Schmerzgrenze resultiert die Schallwahrnehmung in einer Schmerzwahrnehmung.

⁶² vgl. Ellermeier/Hellbrück (2008), S. 52

Klangliche Phänomene wie die Lautstärke, Tonhöhe und die Klangfarbe, um nur einige zu nennen, beschreiben die zweite Gruppe auftretender Empfindungen, genannt überschwellige Empfindungsgrößen. Diese hervorgerufenen Empfindungen liegen meist subjektiven Attributen zu Grunde, sind also Empfindungen die von jedem Menschen anders wahrgenommen und beurteilt werden. Sie stellen aber die wichtigsten Merkmale der Musikerkenntnis dar.

4.2 Was klingt, was rauscht?

Musik klingt, Rauschen lärmt - dies ist die Auffassung der meisten Menschen. Was mit dem Begriff Rauschen einhergeht ist immer eine gewisse Unordnung die sich in der Wahrnehmung als störend herausstellt und das Gehör überfordert. Selbst die Informationstheorie, die sich mit dem Rauschen als Störung auf der Übertragungsstrecke einer zu übermittelnden Nachricht befasst, sagt dem Rauschen ein „Höchstmaß an Nicht-Vorhersagbarkeit und Unordnung“⁶³ voraus. Die Musik im Kontrast dazu stellt eine geordnete Struktur dar, die durch Harmonie einen Wohlfühlcharakter im Gehör induziert. Wohlfühlen deshalb, weil der organisierte Schall als einzelner Sinuston einen Grundton besitzt der in der Empfindung eine Tonhöhe auslöst mit der das Gehör eine Erfahrung verbindet um den Ton einzuordnen. Die Charakterisierung der Tonhöhe verschiedener einzelner Töne, also der Ordnung der Töne auf der Tonleiter, bildet die Grundlage in der Melodieerkennung. Die gesamte musikalische Struktur, genauso wie Sprache, besteht jedoch nie aus einzelnen Tönen, sondern bildet ein Konstrukt verschiedener akustischer Signale zu einem komplexen Ton oder auch Klang. Zusammengesetzt ist der Klang aus einem Hauptschwingenden Grundton, verantwortlich für die Tonhöhe und den gleichzeitig, aber mit unterschiedlichen Amplitudenwerten klingenden Obertönen.

Diese Zusammensetzung verschiedener Frequenzen zu einem Klang mit seinem Grundton und den Obertönen, ist das ausschlaggebende Merkmal der Klangfarbe. Bestimmend durch die Amplituden der einzelnen Teiltöne lässt sich ein Instrument akustisch von einem anderen, das mit gleicher Lautstärke dieselbe Tonhöhenfolge spielt, unterscheiden. Durch die vorausgesetzte Periodizität eines Klangs stehen die Obertöne in einem ganzzahligen vielfachen Verhältnis zum Grundton und wiederholen sich periodisch, wodurch ein klarer Tonhöhen Eindruck ermöglicht wird. Ein solches deterministisches Signal⁶⁴, also ein Signal dessen Werteverlauf über der Zeit konstant und daher vorausgesagt werden kann, kommt in der Natur so nicht vor. Unendliche Periodizität ist kein musikalisches Phänomen, denn wer weiß schon beim Hören eines Musikstückes was als nächstes kommt? Ein richtiges Linienspektrum und eine damit verbundene unendliche Wiederholung ist in der Musik faktisch unmöglich. Nur für einen kurz

⁶³ Scheib (1995), S.74

⁶⁴ s. Höldrich (1995), S.130

angespielten Ton oder Klang, ohne jegliche Einschwingphase und Ausklingen, damit die Amplituden der Teiltöne konstant sind, lässt sich ein exaktes Linienspektrum der Sinuskomponenten darstellen. Realitätsmässig steigen die Teiltöne in ihrer Amplitude erst an, erreichen schnell ihr Maximum und klingen wieder ab. Sie sind quasistationär⁶⁵ das bedeutet das die Amplituden nicht konstant sind, sondern ab- und zunehmen. Genauer gesagt weist das Obertonspektrum bei einer periodischen Wiederholung stets geringe Veränderungen auf. Zusätzlich kommt hinzu dass das Spielen eines Instruments wie z.B. das Anschlagen einer Gitarrensaite oder Drücken einer Klaviertaste immer noch ein Geräusch in sich birgt. Das Spektrum wird kontinuierlicher und verwischt mehr, wobei die größten Energieanteile weiterhin bei den Teiltönen liegen. Die musikalische Struktur geht jedoch nicht verloren, da das Gehör immer noch eine Ordnung vernimmt. Ob jetzt harmonisch oder nicht (Obertöne im ganzzahligen Verhältnis zum Grundton), solange das Ohr die im akustischen Signal vorkommenden Frequenzen zuordnen kann (Grundtonerkennung), wird daraus ein Ton oder ein Klang definiert.

Hierbei stellt sich die Frage ob ein Rauschsignal neben einer Klangfarbe einen Grundton besitzt, durch den genauso wie mit dem Klang eine Tonhöhen- oder Melodieempfindung vernommen werden kann und das Rauschen so zur Musik werden würde. Ausschlaggebend ist die Betrachtung in welche Signalkategorie das Rauschen fällt. Allein das englische Wort für Rauschen „noise“ steht für zweierlei; dem Rauschen als Störsignal wie man es in der Akustik und Informationstheorie versteht und dem Geräusch. Das Geräusch im Kontrast zum komplexen Ton ist aperiodisch und hat daher eine sich ändernde Struktur über der Zeit. Es klingt als ein in der Natur vorkommendes Phänomen nie gleich. Übertragen in den Frequenzbereich schwingt hier nicht der Grundton mit seinen Obertönen als einzelne Linien im Spektrum, sondern zeigt sich, wie schon beim Rauschen und den quasistationären Signalen, ein kontinuierlicherer Verlauf durch die Überlagerung von Schwingungen mit beliebigen Frequenzen. Es wird also kein genauer Tonhöhereindruck wahrgenommen.

Jedoch fallen nicht alle Geräusche in die Kategorie des kontinuierlichen Spektrums. Sofern das Geräusch ein tonalen Charakter besitzt, z.B. eine rhythmische Struktur (Propellergeräusch des laufenden Ventilators) und dadurch eine relative periodische Wiederholung aufweist, kann das Gehör eine Tonhöhe wahrnehmen und einordnen. Das Geräusch wird geordneter, musikalischer oder einfach nicht zwingend als störend empfunden. Es wird etwas bekanntes (Melodie) erkannt und eine Klangfarbe erkenntlich. Daraus resultiert ein komplementärer Zusammenhang⁶⁶ der Musik mit dem tonalen Geräusch (Linienspektrum), indem das Gehör diejenigen Anteile aus dem breiten Frequenzspektrum des Geräuschs herausfiltert, die es einzuordnen und Erfahrungsgemäss zu beurteilen weiß. Musik bildet sich aus der Ordnung des Geräuschs ab.

⁶⁵ ebd.

⁶⁶ vgl. Baumann (1995), S.28

Solche Geräusche, die im Gegensatz zum tonalen Geräusch einen breiten Frequenzbereich aufweisen, haben jedoch keine bestimmte Frequenz die repräsentativ für das Geräusch steht. Es gibt keine dominanten Frequenzen im Spektrum die Ordnung vermuten lassen würden weshalb es über die Zeit gesehen immer unterschiedlich klingt. Das Gehör kann folglich keine Tonhöhe zuordnen. Diese Verwischung im Spektrum weist allein in optischer Hinsicht schon eine Unordnung auf und spiegelt sich auf akustischer Ebene in einem lärmenden Ton wieder. Der Lärm als akustisches störendes Element oder einer Reizung des Gehörs, das die Schmerzgrenze der Schallempfindung anspricht, steht in jeglichem Kontrast zu einer klingenden Welt. Es entspricht „dem Klang, den man nicht mag“⁶⁷. Jedoch bildet dies das Extrem und nicht alle Geräusche sind gleichbedeutend mit Lärm. Nun ist es eine Frage der Wahrnehmung, ob das Geräusch die Schwelle des subjektiven Unangenehmen überschreitet und sich das Geräusch als Lärm widerspiegelt, oder ob eine Struktur oder Bekanntes vernommen wird, wodurch das Geräusch durch das Gehör definiert werden kann.

Die Struktur eines Signals liegt im Determinismus, der Wiederholbarkeit. Doch was ist wenn alle zukünftigen Ereignisse unbekannt und unabhängig vom vorhergehenden Signal sind. Rauschen als solch stochastisches unkorreliertes Signal ist rein zufällig. Im Gegensatz zum Klang oder auch dem tonalen Geräusch dessen Energie sich auf die einzelnen Töne im Spektrum und besonders dem Grundton erstreckt, verteilt sich die Energie beim Rauschen auf den kompletten wahrnehmbaren Frequenzbereich. Der quasistationäre Zustand bei dem das Geräusch bei mehrmaligen Wiederholungen fast immer gleich klingt bildet den größten Kontrast zum Rauschen, wo jede akustische Wiederholung sich vollständig vom vorhergehenden Ereignis unterscheidet. Von Ordnung keine Spur, die komplette Fülle der Wahrnehmung wirkt auf einen ein. Die Beziehung des Rauschens zu dem charakterisiertem Geräusch als Lärm liegt daher bei erster Betrachtung näher als zu einem tonalen Geräusch oder gar Musik. Das Rauschen umfasst jedoch alles in sich. Jedes Geräusch, jeder Klang und jede Musik sind theoretisch ein Element des Rauschens. Das Chaos muss nur organisiert werden damit eine Tonhöhe vernommen und eine angenehme Empfindung ausgelöst werden kann. Die Tonhöhe, durch den Grundton bestimmend, ist nichts anderes als die Frequenz einer einzelnen Sinusschwingung. Das Rauschen besteht aus einer sehr großen Anzahl an Sinusschwingungen. Warum hören wir trotzdem keine Melodie? Im Unterschied zum Klang verteilt sich beim Rauschen die Energie, d.h. die Amplitude, nicht auf eine charakteristische Frequenz, sondern auf alle Frequenzen. Jeder Ton ist theoretisch der Grundton und dazu gleich Laut. Somit ist es für das Gehör aber unmöglich eine eindeutige Zuordnung der Tonhöhe zu treffen. Durch die gegebene statistische Verteilung des stochastischen Signals kann es aber immer zu kurzen Momenten kommen bei denen eine Frequenz dominiert und dadurch das Gehör, zumindest für einen kurzen Zeitpunkt,

⁶⁷ Varése (1962), zitiert aus Weibel (1995), S. 83

einen Tonhöhereindruck empfindet. Ein gewisser Spektralanteil sticht hervor wodurch eine kurzzeitige Ordnung entsteht. Dieses Phänomen dürfte jedem bekannt sein, der schon einmal einen längeren Zeitraum über Rauschen gelauscht hat. Man meint bestimmte Töne wahrgenommen zu haben oder für einen kurzen Augenblick so etwas wie eine Melodie zu vernehmen. Musik wird wahrgenommen, wo keine ist. In Analogie dazu kann auch das Störbild des Fernseherers herangezogen werden. Dieses stellt nichts anderes als optisches Rauschen dar, also ein Signal mit statistisch verteilten hellen Bildpunkten, wobei auch hier bei längerer Betrachtung eine kurzzeitige Mustererkennung stattfinden kann.

Durch die oben erwähnte gleiche Energieverteilung im Rauschsignal sind auch die Verhältnisse der Teiltöne zueinander, wie sie bei der Definition vom komplexen Ton klassifiziert sind, beim Rauschen nicht vorhanden. Ganzzahlige vielfache des „Grundtons“ verwischen zu einem Tongemisch und sind eigentlich nicht vorhanden. Eigentlich, weil normalerweise der Grundton der lauteste Ton darstellt und die Obertöne eine geringere Amplitude aufweisen. Aber wenn jetzt alles gleich verteilt ist, was ist dann Grundton und was sind die Obertöne. Um diese beiden zu differenzieren lässt sich eine Ordnung erst durch Filterung des Rauschens strukturieren. Eine Anhebung einzelner harmonischer Sinusschwingungen aus dem kontinuierlichen Klangspektrum des Rauschen in einem ganzzahligen Verhältnis, im Bezug zu einer dominanten Frequenz, erzeugt eine Klangfarbe. Diese, auch wenn künstlich, erzeugte Klangfarbe tritt aus dem Rauschen hervor und lässt uns einen Klang wahrnehmen. Obwohl dieser Klang vom Rauschen überlagert ist besitzt er dieselbe Obertonstruktur wie ein identischer aus einfachen Sinusschwingungen aufgebauter komplexer Ton. Die heraustretenden Formanten aus dem gesamten Spektrum klingen mit der gleichen Farbe.

Trotz alledem zeigt dies uns, dass wenn nicht bewusst mit technischen Mitteln in das Klangspektrum des Rauschens eingegriffen wird es immer noch eine lärmende Struktur aufweist, „als Klang lässt es jeden Tonhöhereindruck vermissen“⁶⁸. Ordnung ist eher zufällig oder herbeigerufen. Trotzdem steckt etwas im Rauschen. Deutlicher wird dies mit der Betrachtung eines schmalbandigeren Rauschens wie bei den tonalen Geräuschen. Selbst Rauschen weist in der natürlichen Vorkommnis nicht immer ein kontinuierliches, glattes Spektrum über den gesamten Hörbereich auf. Bei dem Spektrum eines Wasserfall z.B. bei dem die einzelnen Tropfen zu unterschiedlichen Zeiten auf Gestein oder die Wasseroberfläche auftreffen, erstreckt sich die Energieverteilung auf den Bereich tiefer Frequenzen (1/f-Rauschen). Durch den Wegfall hoher Frequenzen entsteht eine neue Form, ein schmalbandiger Ausschnitt aus dem Ganzen, bei der nicht mehr alle wahrnehmbaren Frequenzen dominieren. Der Frequenzbereich, als Ausschnitt aus dem kompletten Rauschspektrum, ist als Ganzes dominant und markiert die Klangfarbe die viel charakteristischer ist und sich schon beim ersten kurzen Hören einstellt. Das

⁶⁸ Höldrich (1995), S.131

Gehör muss nicht mehr alle Frequenzen analysieren um Obertöne zu erkennen damit es eine Klangfarbe zuordnen kann. Folglich hat ein schmaleres Spektrum mehr Klangcharakter. Doch immer noch ausschlaggebend für eine klangliche Wahrnehmung und eventueller Verschmelzung zu Musik ist die Empfindung einer Tonhöhe. Wie bei einem tonalen Geräusch muss die Struktur geordneter sein. In Anlehnung an den komplexen Ton sind bei dem tonalen Geräusch nicht alle Frequenzen vertreten. Die Ordnung liegt neben der weiter oben besprochenen Wiederholung folglich auch in der „Kürze“, also einem bestimmten Frequenzausschnitt. Wird ein Rauschband in seinem Frequenzbereich nun soweit verkleinert das seine Breite sich dem tonalen Geräusch und dem Ton annähert, kann eine genauere Frequenzwahrnehmung und dadurch eine Ordnung vernommen werden. Es entsteht ein schmalbandiges tonales Rauschen und folglich eine Tonhöhenwahrnehmung. Technisch definiert ist dies durch die kritische Bandbreite, die besagt, das ab einer Bandbreite die kleiner als 20 % der Mittenfrequenz ist, ein Ton als einzelner solcher wahrgenommen wird und ein Tonhöhen Eindruck entsteht⁶⁹. Die kritische Bandbreite ist hierbei äquivalent mit einer kleinen Terz.⁷⁰ An diesem Punkt verschmilzt das schmalbandige Rauschen zu einem tonalen Geräusch und bekommt durch eine Tonhöhe einen festen⁷¹ Klangcharakter. Mit der Erstellung verschiedener Rauschbänder könnte sogar die Tonleiter aus Rauschen entworfen werden. Die Grenze zur Musik verwischt immer mehr, denn was jetzt wirklich noch Rauschen oder Musik ist, ist gerade in der Zeit der elektronischen Musik Auslegungssache.

Noise übersetzt als Rauschen und Geräusch macht bei näherer Betrachtung also Sinn, da wir bei beiden Klanggruppen zwei Extreme haben. Das Rauschen mit einem glatten, kontinuierlichen Spektrum steht dem Lärm gegenüber das sich durch dieselben Kategorisierungen ausweist. Als ein Spektrum von allem, enthält es auch alles, jedoch kann durch die fehlende Wiederholung des Signals keine Tonhöhe und eindeutige Klangfarbe zugeordnet und beurteilt werden. Lärm und Rauschen bilden folglich eine große Unbekannte. Den näheren Bezug zum Klang und der Musik haben daher das tonale Geräusch, dem ein schmalbandiges Rauschen gegenübersteht. Sie sind Inhalt des breiten Rauschens, lösen sich jedoch aus diesem heraus. Beide können eine feste Tonhöhe aufweisen wodurch eine geordnetere Struktur, von der in der Musik so häufig die Rede ist, erkannt werden kann und das Gehör dessen ausgelöste Empfindungen angenehmer wahrnimmt. Die Grenzen fließen immer mehr zusammen. Auch durch die Wahrnehmung alldem lässt sich die Gegenüberstellung des Rauschens zum Geräusch näher erläutern. Das bekannte steht dem unbekanntem gegenüber.

⁶⁹ ebd., S.139

⁷⁰ ebd.

⁷¹ fest deshalb, weil wie weiter oben in dem Beispiel mit dem weißen Rauschen beschrieben sich durch die statistische Verteilung ab und an Tonhöhen aus dem Spektrum herauskristallisieren können.

4.3 Die Entspannung liegt im Meeresrauschen

Mit der zeitlichen Weiterentwicklung in der Musik, aus der immer mehr Kombinationen von Klängen mit Geräuschen hervorgehen, ändert sich auch die komplette Wahrnehmung dessen. Natürliche Klangphänomene⁷² kommen nie als einzelne Töne & Geräusche vor, sondern sind immer ein Zusammenschluss von tonalen Geräuschen mit Rauschanteilen. Das in Kapitel 4.2 beschriebene Beispiel des laufenden Ventilators ist nichts anderes als „die Kombination aus dem tonalen Umdrehungsgeräusch des Motors und dem aerodynamischen verursachten Rauschen der Rotorblätter“⁷³. Auch in der Instrumentalmusik birgt das Spielen eines Instruments immer ein sich addierendes Geräusch oder Störsignal in der Anfangsphase mit sich. Bevor z.B. die Saite der Geige richtig angespielt wird resultiert durch die Berührung des Bogens mit der Saite ein Geräusch. Klänge werden durch die Anteile der Störcharakter geräuschhafter. Das Gehör hat sich an solche geräuschhafte Klänge gewöhnt und weiß diese einzuordnen. Es entspricht einem natürlichen Phänomen, ist allerdings menschlich unterschiedlich ob diese als angenehm oder als störend gelten. Solche klanglichen Kategorisierungen unternimmt jeder Mensch individuell und rein subjektiv, ist jedoch ein ausschlaggebendes Merkmal für die realistische Empfindung musikalischer Nachbauten. Klänge und Sound-Libraries akustischer Instrumente benötigen heutzutage nicht mehr das Spiel der wirklichen Instrumente, sondern lassen sich durch computergenerierte Klänge erschaffen. Um das Klangbild dieser synthetischen Klänge realistisch darzustellen ist es notwendig die in der Wirklichkeit vorkommenden geräuschhaften Signale mit einzubeziehen. Meist geschieht dies durch Hinzunahme kurzer Rauschimpulse. Denn nicht das einfache Klangspektrum ist für die realistische Wahrnehmung relevant, sondern der Klang mit allen zusätzlichen Geräuschsignalen im Kontext bildet die Empfindung ab.

Im Gegensatz zur Empfindung geräuschhafter Klänge hat sich der Mensch schon eine feste Empfindung gegenüber Rauschen im spektralen Ganzen oder z.B. dem Lärm des Verkehrs gemacht. Der moderne Mensch ist ein Stadtmensch geworden, der dem alltäglichen Lärm ausgesetzt ist. Er ist nach Baumann [1995, S. 31] geräuschverschmutzt („noise pollution“). Zur Folge hat dies eine verschobene Wahrnehmungsschwelle welche die Menschen immer unempfindlicher gegenüber dem Grundrauschen der Städte werden lässt. Selbst in der Musik ist diese zunehmende Reizsteigerung⁷⁴ zu beobachten, bei der das Spektrum der heutzutage so oft angewendeten totkomprimierten Aufnahme immer mehr dem Spektrum von Rauschen

⁷² s. Höldrich (1995), S.140; Nach DIN 1320 Akustik

⁷³ Höldrich (1995), S.140

⁷⁴ vgl. Baumann (1995), S. 31

gleich. Strapaziert von rauschenden Autobahnen, dem Lärm in der Stadt, dem brummenden Trafo der Wohnzimmerlampe flüchtet sich der Mensch in die Entspannung. Mithilfe von „Regengeräuschen, Meeresrauschen, tropische Urwaldstimmen, Walfisch- und Delphingesängen“⁷⁵, heutzutage als CD zu erwerben, hat der Reizüberflutende Mensch die Möglichkeit abzuschalten. Nichts anderes als Geräusche und Rauschen stellen diese CDs nach. Aber warum lässt sich mit dem Hören eines Rauschens (Meeresrauschen) Entspannung von einem anderen Rauschen (Verkehr, Stadt) erzielen?

Das Rauschen der Stadt lässt keine Entspannung zu. Durch seinen dynamischen Charakter ist es ständig in Bewegung und lässt immer Neues entdecken. Die Gegebenheit dass etwas genauso klingt wie vorher ist ziemlich unwahrscheinlich. Einzelne Geräusche und Klänge bilden ein Gesamtgeräusch (Gesamtrauschen). Theoretisch erstreckt es sich zwar auf den kompletten Hörbereich und hat damit ein weißes Spektrum, aber vereinzelt heraustretende Geräusche (kurzer lauter Impuls wie eine Sirene, Mülltonnenleerung der Müllabfuhr, vorbeifahrendes Auto usw.) wirken auf das Gehirn „aurosal“ und aktivieren damit eine erhöhte Wachsamkeit.⁷⁶ Der Mensch wird aus der bekannten Wahrnehmungsform gerissen und bekommt ein ungutes Gefühl. Er fühlt sich in dieser neuen Form der Wahrnehmung nicht mehr vertraut und assoziiert das Rauschen mit einer Unbekannten,⁷⁷ die seine Aufmerksamkeit immer fordert. Auf der Suche nach gewohnten Anhaltspunkten in diesem hektischen Geschehen soll der Weg aus der Irritation zurück in die Entspannung und dem Bekannten folgen. Einzelne Töne wollen, aber können nicht individuiert werden. Diese Desorientierung birgt eine stressbehaftete Empfindung in sich. Alles ist laut und macht Krach. Womöglich ist dies auch der Grund, warum in Großstädten wie z.B. Berlin, New York und Tokyo die Menschen grundsätzlich hektischer und unfreundlicher sind. Sie kommen durch den ganzen Trouble nicht zur inneren Ruhe was sich in ihrem Gemüt niederschlägt.

Ein geräuschbehaftetes Rauschen im Kontrast zu den in der Musik geräuschhaften Klängen ist das Ergebnis aus dem Lärm der Stadt. Das grundsätzliche Rauschen kann nicht „unhörbar“⁷⁸ werden, normalerweise durch die monoton wirkende Reizüberflutung ausgelöst, denn die herausstechenden Signale holen einen immer wieder in den Bewusstseinszustand zurück. Dies bedeutet, dass das Gehör immer nur kurzzeitig entspannen kann, bis es wieder geweckt und damit in „Alertness“⁷⁹ versetzt wird. Die vollste Aufmerksamkeit wird dabei verlangt um von den aus dem Rauschen austretenden tonalen Geräuschen die Tonhöhe einzuordnen und zu

⁷⁵ Baumann (1995), S. 39

⁷⁶ Thiel / Fink (2007), S. 168; „Aurosal bezeichnet einen Zustand erhöhter physiologischer Aktivität.“

⁷⁷ vgl. Sanio (2001), S. 223

⁷⁸ Kaegi (1967), zitiert von Höldrich (1995), S. 138

⁷⁹ Thiel / Fink (2007), S. 168; „Alertness“ bezeichnet die Aufmerksamkeitsaktivierung und die erhöhte Bereitschaft auf auftretende Reize zu antworten.“

beurteilen und nach einer Melodie zu Lauschen um bekannte Bezüge herzustellen. Untersuchungen über die Funktion des Auditorischen Systems von Patterson et al. (2002)⁸⁰ ergaben, dass durch ein quasiperiodisches Testsignal das einem Rauschen glich (vgl. schmalbandiges Rauschen) mit entweder einer festen, einer sich melodischen oder einer sich zufällig ändernden Tonhöhe besonders die rechte Gehirnhälfte aktiviert wurde. Diese ist vorwiegend für die Kreativität und die Erkennung von Melodien zuständig und erfordert dadurch mehr Aufmerksamkeit. Zufällige Tonhöhen benötigen besondere Konzentration um einen bekannten Bezug auszulösen. So kann das Rauschen der Stadt niemals monoton und damit ausgeblendet werden, da die rechte Gehirnhälfte durch die unbekanntes heraustretenden Geräusche dauernd „in Arbeit“ ist und „gereizt“ wird.

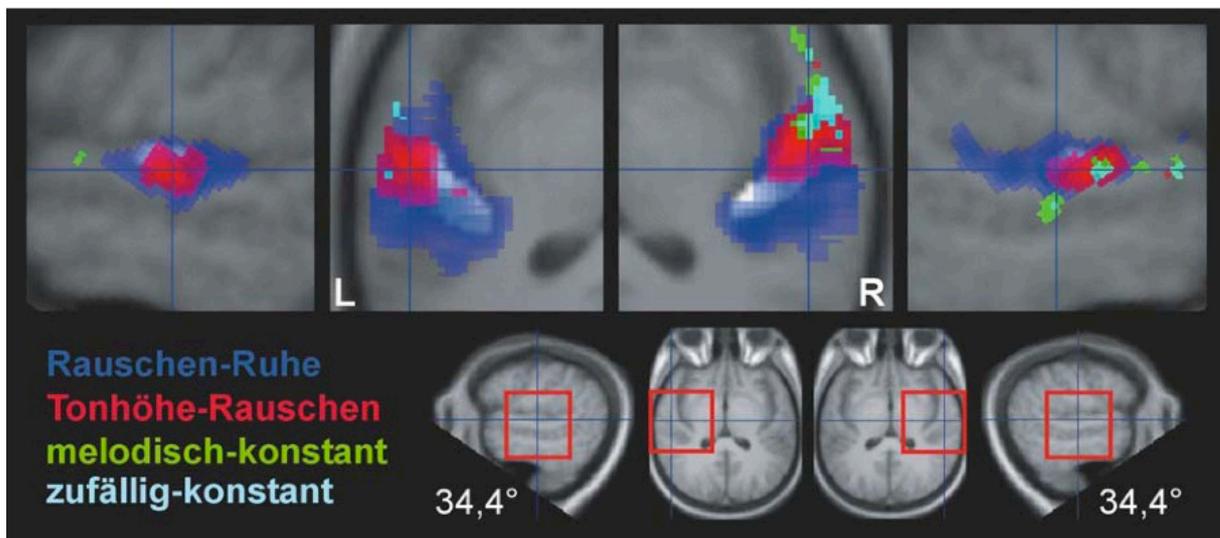


Abb. 16: Differenzielle Aktivierung durch die Wahrnehmung von Rauschen

Wie durch die Dynamik des Stadt- oder Verkehrsrauschen die Wahrnehmung andauernd gefordert wird, gleicht die eines Meeresrauschens oder dem Rauschen des Waldes eher einem statischem Prozess. Genauer gesagt, es passiert nicht viel, oder einfach zu viel. Rauschen führt zu einer Überflutung des Trommelfells⁸¹. Das Gehirn kann die Menge einzelner Signale nicht mehr zuordnen und unterscheiden. Für das Gehör hört sich alles gleich an und daher flüchtet es sich in die Einbildung und Entspannung. Eine Regelmässigkeit der diffusen Schalldichte schlägt sich in einer scheinbaren Monotonie nieder. Scheinbar deshalb, weil das Rauschen alles andere als monoton ist, nämlich eine ständige sich verändernde Variation. Aber diese Variation des stochastischen Zufallssignal erzeugt keine wahrnehmbaren Unterschiede wodurch sich ein festes Klangbild einstellt. Der gesamte akustische Eindruck wirkt aufgrund fehlender Unbekanntes Faktoren, die beim Stadtlärm aus dem Gesamtspektrum differenziert werden,

⁸⁰ s. Krumbholz / Fink (2007), S. 259

⁸¹ vgl. Helwig (2008), S. 8

periodisch und resultiert in der Wahrnehmung einer festen Klangfarbe. Die eigentliche Reizüberflutung bewegt sich in der bekannten Wahrnehmungsebene. Keine neuen Ereignisse die einen Instinkt auslösen (s. oben: „aurosal“ oder „alertness“) kommen hinzu, weshalb das Gehör diese Signale ausblenden kann. Jeder kennt das nervige ticken des Weckers welches einen vom Einschlafen abhält. Das statistische Geräusch der Zeiger erscheint irgendwann als sekundär, bis zur völligen Isolation dessen. Oder auch das helle Summen des Laptops oder das Brummen der Lampe oder der Heizung. All diese Rauscharten werden mit der Zeit irrelevant und überhört. Es treten keine lauten Geräusche auf die sich abheben und eine Kategorisierung verlangen. Man muss sich nicht mehr Gedanken darüber machen woher ein Geräusch kommt oder was es ist.

Es zeigt sich auch das Signale, die das Gehör abschalten lassen immer eine gewisse Konstanz aufweisen und eine meditative Wirkung haben. Die Wellen schlagen immer im fast identischen Takt auf den Strand und der Wecker tickt mit einer Frequenz von 1 Hz. Solche Prozesse sind sich über der Zeit kaum verändernde Strukturen, also quasiperiodisch und liegen keiner kreativen Denkarbeit, wie es in der rechten Gehirnhälfte vonstatten geht, zugrunde. Logik und Struktur machen sich breit und werden Aufgabe der analytischen linken Gehirnhälfte. Die Rhythmusverarbeitung von Musik läuft z.B. in diesem Trakt des Gehirns ab und auch monotone konstante Signale werden „links“ verarbeitet. Durch die Ausprägung oder der größten Arbeitsverrichtung in der linken Gehirnhälfte der meisten Menschen, haben Prozesse in der rechten Seite (Melodienerkennung bei Geräuschen im Stadtlärm) mehr Arbeits- und daher Denkaufwand. Folglich ist bei konstanten, monotonen Signalen keine große Kategorisierung und Verarbeitung auftretender Signale nötig. Beide Gehirnhälften teilen sich also nun die Arbeit, gut zu sehen auch an der Abbildung 16. Bei dem Versuch von Patterson (Abbildung 16) ist deutlich zu erkennen das bei einem Rauschen mit kontinuierlichen Spektrum die Arbeit sich gleichmässig auf beide Gehirnhälften verteilt (blau). Ruhe, Entspannung und auch Müdigkeit stellen sich ein. Als gutes Beispiel kann hier auch das Klatschen nach einem Konzert oder einer Theateraufführung herangezogen werden. Der Applaus als Ganzes ist laut und durcheinander (--> Rauschen in der Kategorie des Lärms). Keine fest definierten Geräusche lassen sich aus dem Gesamten selektieren oder eine Tonhöhe erkennen da das Klatschen ein chaotisches Durcheinander ist. Trotzdem versucht das Gehör eine Ordnung zu finden und zu strukturieren (Kreativität). Arbeit findet statt, man ist aufmerksam bei der Sache. Wird das Klatschen jetzt jedoch, wie meist üblich (besonders bei Zugaben), rhythmisch, d.h. wird in einem Takt geklatscht, wird das Rauschen strukturierter und unterliegt einer Ordnung mit der das Gehör Bekanntes verbindet (Logik). Das Klatschen klingt angenehmer. Ein Gemisch aus Struktur und Klang verteilt sich gleichmässig auf beide Gehirnhälften und die Konzentration lässt nach.

Dieses Beispiel zeigt auch eine Zusammenfassung der Wahrnehmung des Rauschens auf. Unbekanntes überfordert einen, da man versucht aus dem Unbekannten bekannte Anhaltspunkte herauszufiltern oder über Tonhöhen bekannte Ordnung zu definieren. Prozesse dieser Art sind anstrengend und verlangen viel Konzentration, denn das Ohr wird ständig gereizt und lässt sich auch durch einen sich ständig wechselnden Klangeindruck keine genaue klangliche Kategorisierung einstellen. Das genaue Gegenteil von Entspannung, wie es bei der Überlagerung vom aggressiven Grundrauschen der Stadt mit Geräuschen zu einem Gesamtrauschen oder auch Stadtlärm eintritt. Das heraustretende Geräusch ist Faktor der inneren Unruhe, denn diese gilt es zu analysieren und einzuordnen. Man kann sich nicht an die Autobahn setzen und relaxen, denn jedes vorbeifahrende Auto startet einen Arbeitsprozess im Gehirn. Erst Prozesse die keiner genauen Analyse und Einordnung im Gehirn unterliegen und durch Wiederholung gleich klingen, d.h. bekannte Ruhe wie das Meer oder wenn auf besagter Autobahn kein Auto fahren würde und nur der wehende Wind durch die Bäume zu hören ist lassen Entspannung zu. Reizfaktoren die durch benötigte Analyse einen in den Bewusstseinszustand zurückholen sind nicht vorhanden. Struktur durch die sich wiederholende Klangfarbe ist das Resultat. Je nach spektralem Aufbau empfinden wir bekanntes oder unbekanntes.

4.4 „Hilfe, es rauscht...!“

Betrachtet man die Rauschwahrnehmung jetzt angewandt auf die Musik oder der Audiotechnik wird einem bewusst, dass hier eine andere Gesetzmäßigkeit herrscht. Obwohl ein reines Rauschsignal ohne jegliche wahrnehmbaren „Geräuschspitzen“ monoton und damit ausblendungsfähig ist, fällt es beim Hören von Musik immer auf. Wenn sich ein Rauschen mit einem Musikstück oder der Aufnahme einzelner Instrumente überlagert, ist das immer der schlimmste Fall den es in der audiophilen Welt gibt. Was das Geräusch in dem überlagernden Rauschen der Stadt ist, ist das Rauschen in der Musik, nämlich das störende Unbekannte das austritt.

Unter der Interpretation von Höldrich [1995, S. 127] beschriebenen Wahrnehmung lässt sich die Wahrnehmung von Rauschen in der Musik anhand von zwei Punkten erläutern. Zum einen unterscheidet jeder für sich selber was er als Störung und was er als Information ansieht. Ist das Rauschen ein Feind oder ausschlaggebend für den transportierten Klangcharakter. Manche, die auf stark verzerrte Gitarren stehen, empfinden möglicherweise das Rauschen des Gitarrenverstärkers als angenehm, besonders weil sie damit den bekannten Klang des Verstärkers assoziieren. Dem steht die neue Generation der Musikproduktion gegenüber, die in ihrer digitalen Welt leben. Solche klinisch trockenen Produktionen erreichen erst im DA-Wandler

und Verstärker das „analoge Tageslicht“⁸², weil sie vorher bis auf das mögliche Quantisierungsrauschen keiner Gefahrenquelle für Rauschen ausgeliefert waren. Beide Gruppierungen haben ein grundsätzliches kontroverses Verhältnis zueinander und definieren ihre Art der Störung jeweils anders. Die Auffassung davon hängt aber auch mit dem Erfahrungsschatz zusammen, der laut Höldrich (1995) als zweiter Punkt mit der prinzipiellen Fähigkeit zum Verstehen gedeutet werden kann. Nach der Trennung von Störung und Information ist es natürlich ausschlaggebend was wir mit der Information anfangen können. Ob wir die Absicht verstehen mit der das Rauschen möglicherweise in die Musik gemischt wurde und eine Intention sich dahinter verbirgt. Gerade Toningenieure älteren Jahrgangs die mit der kompletten rauschbehafteten analogen Technik aufgewachsen sind, sind möglicherweise nicht so voreingenommen gegenüber dem Rauschen wie die digitale Generation. Für diese neue ausschließlich rechnergestützte Musikproduktion ist Rauschen der größte Erzfeind. Das eventuell mit einer alten Bandmaschine mit geringerem Rauschabstand als ein Pro Tools HD-System aufgenommen wurde, oder ein Original Fairchild Kompressor eingesetzt wurde um einen warmen analogen Klang zu erzielen, der durch den Schaltungsaufbau mit elektronischen Bauteilen immer mit etwas Rauschen behaftet ist, zeugt von einer beabsichtigten Intention. Die Garde zeitgenössischer Produzenten stört sich eher an den verbundenen Rauschanteilen die auftreten können. Schon das leiseste Rauschen, sofern wahrnehmbar, wird in der Musikproduktion als Feind empfunden. Hannes Bieger bringt es gut auf den Punkt, wenn er sagt, dass aus dieser klanglichen Mücke ein Elefant gemacht wird[05/2008,S.100]. Jedoch sollen hierbei nicht die neuen Produktionsweisen schlecht geredet werden, sondern eher wie sehr das Rauschen zum größten Feind wurde. Die Produktionsumgebungen werden immer steriler wodurch sich auch die subjektive Schwelle einer sauber klingenden Aufnahme verändert hat. Den Charakter eines Geräuschs oder dem bekannten monotonen als Auslöser für Entspannung verliert das Rauschen hier komplett. Rauschen hat in der Audiotechnik von vornherein das Bild von Lärm. Einfach deshalb, weil es sich im Laufe der Zeit die Eigenschaft angeeignet hat einfach nicht dazu zugehören. Die Trennung von Information und Störung unterzieht sich der Erfahrung die von vornherein feststeht. Aber ob es immer so schlimm ist und beabsichtigte Intentionen sogar dahinter stecken ist ein großes Thema dieser Arbeit mit der sich das nächste Hauptkapitel befasst.

4.5 Die farbige Welt des Rauschens

Ob jetzt Störfaktor oder Information, Rauschen ist neben der mittlerweile bekannten Einteilung in tonal oder all umfassend nicht gleich Rauschen. Rauscharten können unterschiedlich klingen

⁸² Bieger (05/2008), S.100

und auch eine unterschiedliche Wirkung auf die Wahrnehmung auslösen. Bereits bei der Definition des Wortes „noise“ zeigte sich das neben den allumfassenden Rauschen, selbst in der natürlichen Vorkommnis Ausschnitte aus diesem Spektrum austreten. Jeder Ausschnitt hat eine spezielle Klangfarbe, die hier nicht durch die Zusammensetzung des Grundtones mit den Obertönen definiert ist, sondern durch den Klang des dominanten Frequenzbereichs charakterisiert ist. In Analogie zum Licht bei dem in einem Ausschnitt aus dem Frequenzbereich (Wellenlängenbereich) immer eine andere Farbe stärker oder gar nicht vertreten ist, bekommen die unterschiedlichen Rauschausschnitte farbliche Bezeichnungen die ihren Klang beschreiben. Je nach Energieverteilung im Spektrum, die einer Frequenzzugehörigkeit unterliegt, spricht man vom farbigem Rauschen. Wie schon beim weißen Licht, dass alle optisch erfassbaren Wellenlängen enthält, erstreckt sich das Spektrum des weißen Rauschens über den kompletten akustisch wahrnehmbaren Frequenzbereich.

Weißes Rauschen

Fast alle vorangehenden Definitionen des Rauschens, sei es in technischer oder wahrnehmerischen Hinsicht, befassten sich mit dem weißen Rauschen und seinem allumfassenden Spektrum. Weiß deshalb, weil in Analogie zum weißen Licht, bei dem alle Lichtwellenlängen mit gleicher Helligkeit vertreten sind, hier das komplette Spektrum eine konstante Amplitude aufweist. Theoretisch sind alle Frequenzen gleichmässig vertreten. Die Rauschenergie erstreckt sich nicht auf einzelne Frequenzen, sondern ist für alle Frequenzen konstant. Dies war auch Grund für die fehlende Tonhöheninterpretation, da alles gleichzeitig Grund- und Oberton ist.

Thermisches- und Schrotrauschen sind z.B. beide weißes Rauschen und definieren sich über die konstante Amplitude im gesamten frequenzunabhängigen Leistungsspektrum. Auch als Testsignal in der Audiotechnik um z.B. Mikrofonkanäle zu testen kommt es zum Einsatz.

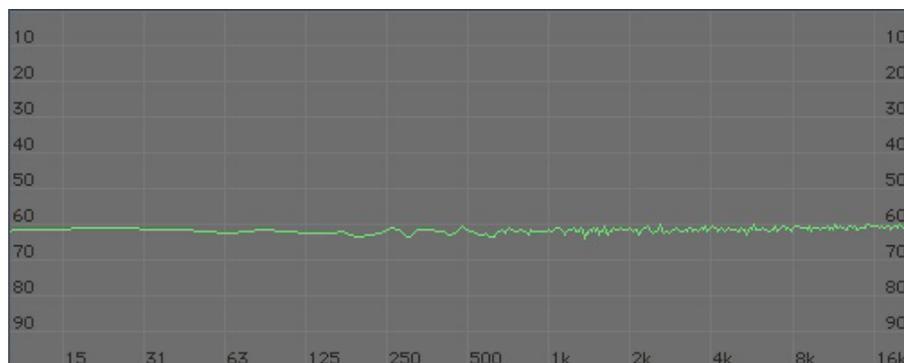


Abb. 17: Energiespektrum des weißen Rauschens

Das weiße Rauschen wird als besonders störend empfunden. Da es alles gleich stark enthält kann keine Unterscheidung für bestimmte Frequenzbereiche und daher der Klangfarbe getroffen

werden, weshalb sich keine bekannten Bezüge einstellen. Nur durch statistische Schwankungen treten kurzzeitig mögliche Melodieempfindungen auf. Jedoch, wenn nicht bewusst beachtet, sind diese irrelevant, denn das Gehör kann durch die Vielzahl an einzelnen Signalen keine Tonhöhen selektieren. Das Signal wird irgendwann wieder „überhört“.

Als überschwellige Empfindungsgröße soll hierbei wieder auf die Lautstärke eingegangen werden, mit der sich gut der störende Charakter des weißen Rauschen erklären lässt. Als subjektiv empfundenes Maß für die wahrgenommene Intensität des Schallpegels ist die Lautstärke abhängig von der Frequenz. D.h. die Empfindung für Schallsignale mit gleicher Intensität, ist für verschiedene Frequenzen unterschiedlich. Deutlich wird dies bei Betrachtung der Kurven gleicher Lautstärken, die dieses Phänomen beschreiben. Für Frequenzen unterhalb 400 Hz ist ein viel größerer Schallpegel zur Empfindung erforderlich als z.B. für Signale im Bereich von 1-4 kHz. Ein viel höherer Pegel ist daher notwendig um hohe und besonders tiefe Frequenzen wahrzunehmen, während im Bereich der Sprachverständlichkeit (400 - 3000 Hz) das Gehör am empfindlichsten reagiert. Je lauter der Gesamtpegel jedoch wird (20/40/60/80 phon Kurve), desto geringer werden die Abweichungen.

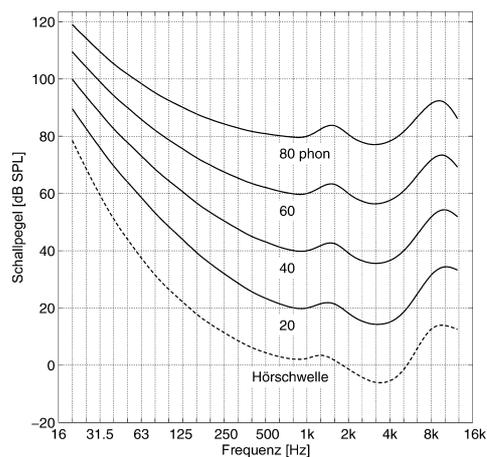


Abb. 18: Kurve gleicher Lautstärken

Diese Phänomen der Intensitätswahrnehmung ist auch sehr wichtig bei der Betrachtung der Wahrnehmung der einzelnen Rauschfarben. Folglich wird weißes Rauschen als sehr aggressiv wahrgenommen. Denn durch die glatte, kontinuierliche Verteilung der Energie im Spektrum, bei der jede Frequenz gleich laut ist, treten besonders hohe Frequenzen in den Vordergrund. In diesem Bereich ist jedoch auch das menschliche Gehör am empfindlichsten, weshalb man das Gefühl bekommt es wären nur hohe Frequenzen im weißen Rauschen enthalten und würden ständig das Gehör bombardieren. Jetzt wird auch der Bezug zum störendsten Rauschen oder dem Lärm verständlicher, denn primär ist nicht nur die Unbekanntheit für die Wahrnehmung verantwortlich, sondern auch die empfundene Verlagerung in den empfindlichsten Bereich der Wahrnehmung. Durch die ständige Reizüberflutung, die sich irgendwann in einer Ausblendung

widerspiegelt, hat das weiße Rauschen eine leicht betäubende Wirkung auf das Gehör und besitzt deshalb die Fähigkeit lärmende, laute Signale zu verdecken.

Rosa Rauschen

Das rosa Rauschen kam schon bei der wörtlichen Definition des Rauschen als Beispiel eines Wasserfalls zum Einsatz. Es stellt einen Ausschnitt aus dem weißen Spektrum dar, bei dem sich die Energiedichte auf den tieferen Frequenzbereich erstreckt. Technisch bedeutet dies, dass die Energiedichte mit zunehmender Frequenz sinkt, d.h. die Leistung ist umgekehrt proportional der Frequenz (mit steigender Frequenz wird die Leistung kleiner). Daher handelt es sich beim rosa Rauschen um das $1/f$ -Rauschen (s. 3.2.3). Der Abfall der Rauschenergie geschieht hierbei mit 3dB/Oktave. Tiefe Frequenzen kommen deshalb stärker zum Ausdruck. Trotzdem bleibt die Rauschenergie über ein bestimmtes Frequenzintervall frequenzunabhängig und daher konstant.⁸³ Auf die Oktave bezogen bedeutet dies, dass jede Oktave dieselbe Energiedichte hat. Erreichen kann man ein solches Rauschen durch Tiefpassfilterung eines weißem Rauschens mit einer Flankensteilheit von 3 dB pro Oktave.⁸⁴

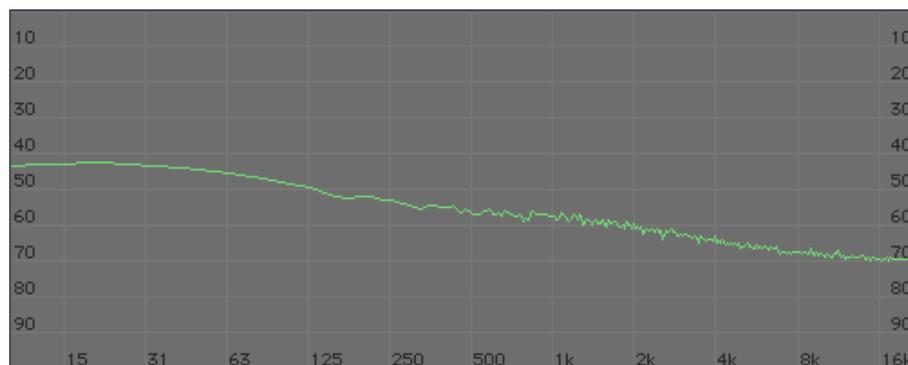


Abb. 19: Energiespektrum des rosa Rauschen

Wahrgenommen wird das rosa Rauschen viel angenehmer als das weiße. Der Grund liegt in dem spektralen Energieabfall hin zu hohen Frequenzen. Dadurch, dass das Gehör für höhere Frequenzen empfindlicher ist und solche beim rosa Rauschen mit geringerer Intensität als tiefe Frequenzen auftreten, entspricht die Wahrnehmung des rosa Rauschens der menschlichen Empfindung von Schallsignalen. Die Wahrnehmung ähnelt der Form der Kurven gleicher Lautstärken (s. Abbildung 18). Durch seine tiefe Klangfarbe wirkt das rosa Rauschen beruhigend und entspannend. Das Rauschen der Wellen, der Wind zwischen den Bäumen oder das niederprasseln der Wassertropfen eines Wasserfalls sind natürlich vorkommende rosa Rauschquellen. Der nicht aggressive Charakter und die direkte Verbindung der tiefen Klangfarbe

⁸³ vgl. Müller (1990), S. 87

⁸⁴ vgl. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Rosa-Rauschen-pink-noise.html> (Zugriff am 21.01.10)

lassen das Rauschen schnell aus der Wahrnehmung verschwinden. Auch durch die tiefe Klangfarbe verbundene Tonhöhe, obwohl keine direkte Zuweisung dafür vorhanden ist, tragen ihren Teil zur Monotonie bei.

Rotes / Braunes Rauschen

Im Gegensatz zum weißen Rauschen, bei dem sich jeder Wert vom vorherigen stark unterscheidet, sind die Änderungen beim braunen Rauschen gering. Das Signal ist stark korreliert, was in der Informationstechnik gleichbedeutend mit einem langweiligen Signal⁸⁵ ist. Genauso klingt es auch. Tiefe Frequenzen sind noch stärker vertreten als beim rosa Rauschen und hohe Anteile sind fast nicht mehr vorhanden. Das wahrgenommene Rauschen wird dabei eher zum Brummen mit einer sehr tiefen Klangfarbe. Hier trifft das Wort Monotonie richtig zu, und zwar nicht wie beim sonstigen Rauschen durch zu viel Änderung, sondern wegen fast keiner Änderung. Denn in einem kleineren Frequenzband das auch weniger Signale enthält, passiert logischerweise wesentlich weniger als in einem breitem Band. Statistische Schwankungen wie sie im weißen Rauschen vorkommen sind hier viel geringer vorhanden.

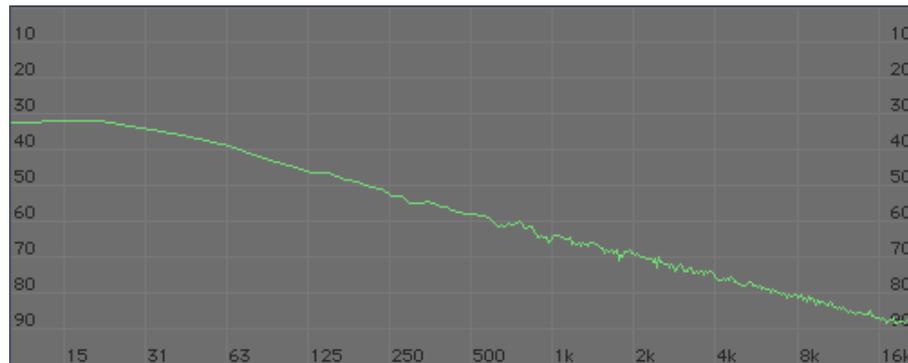


Abb. 20: Energiespektrum des braunen Rauschens

Technisch bedeutet all dies, dass die Energiedichte des braunen Rauschens mit 6 dB pro Oktave abfällt. Der Abfall ist hierbei noch stärker als schon beim rosa Rauschen, nämlich umgekehrt proportional mit dem Quadrat der Frequenz ($\sim 1/f^2$). Deshalb haben tiefere Frequenzen eine überproportionale höhere Energiedichte als höhere Frequenzen.⁸⁶ Das in Halbleitern auftretende Funkelrauschen entspricht dem braunem Rauschen.

⁸⁵ Höldrich (1995), S.135

⁸⁶ vgl. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Rotes-Rauschen-red-noise.html> (Zugriff am 21.01.10)

Blaues Rauschen⁸⁷

Würde das Spektrum vom weißem Rauschen noch weiter als schon beim braunen Rauschen abfallen, würde man bald nichts mehr hören oder in Analogie zum Licht, nichts mehr sehen können. Das Spektrum würde sich soweit in die tiefen Frequenzen verlagern das nur noch ein schmales Band mit einer fest definierten Tonhöhe übrig blieb. Deshalb gibt es den Kontrast zum tiefklingenden Rauschen. Definiert durch eine steigende Energiedichte bei zunehmender Frequenz weist das blaue Rauschen eine Überproportionalität höherer Frequenzen auf. Blaues Rauschen bildet das Pendant zum rosa Rauschen, weshalb dessen Rauschenergie mit 3 dB pro Oktave ansteigt.

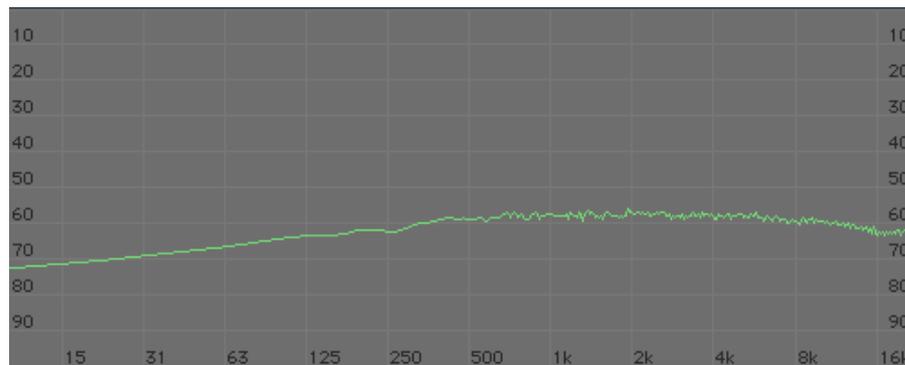


Abb. 21: Energiespektrum des blauen Rauschens

Das blaue Rauschen kommt durch die Empfindlichkeit in hohen Frequenzbereichen sehr aggressiv herüber. Tiefe Frequenzen die sowieso schon schlecht wahrnehmbar sind haben noch geringere Intensitäten, während in den schon empfindlichen Stellen das Rauschen eine noch höhere Energiedichte hat. Ein kribbliges, unruhiges Rauschen ist die Folge, das stark an Dithering⁸⁸ erinnert. Gerade hier in den hohen Frequenzbereichen, in denen die Wahrnehmung viel ausgeprägter ist, macht sich eine stärkere Tonhöhenwahrnehmung breit, die versucht die statistischen Amplitudenschwankungen zu zuordnen. Das Gehör wird dauernd gereizt, folglich befindet sich das Gehirn in ständiger Arbeit und vollster Konzentration. Hier kommt keiner zu rRuhe.

Violettes Rauschen

Wird das Rauschen noch „heller“, im Kontrast zum tiefer klingenden braunem Rauschen, spricht man vom violettem Rauschen. Wie schon beim blauem Rauschen steigt die

⁸⁷ Definiert durch Federal Standard 1037C Telecommunications, <http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/> (Zugriff am 21.01.10)

⁸⁸ Dithering ist das Hinzufügen eines schwachen Rauschsignals um bei digitalen Produktionen leise und daher schlecht aufgelöste Signale besser aufzulösen

Energiedichte hier proportional mit der Frequenz, jedoch mit dem Quadrat der Frequenz ($\sim f^2$), bedeutet also mit jeder Frequenzverdopplung (Oktave) hat die Rauschenergie 6 dB mehr Leistung. Als Äußerung in der Wahrnehmung entspricht diese Rauschen einem reinen Störsignal mit einer sehr aufdringlichen Klangfarbe.

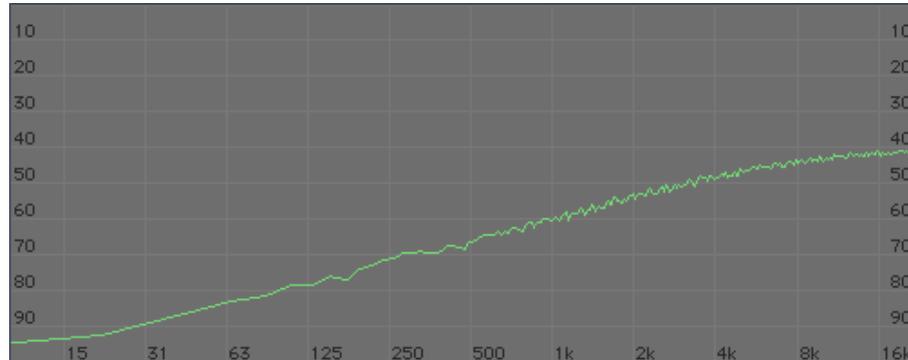


Abb. 22: Energiespektrum des violetten Rauschens

Graues Rauschen

Theoretisch müsste ein Rauschen das der menschlichen Wahrnehmung entspricht als angenehmstes empfunden werden, da der Eindruck entsteht alle Frequenzen wären gleichmässig im Signal vertreten. Es steht im Kontrast zum weißen Rauschen, dass ungleichmässig verteilt erscheint und ist der menschlichen Empfindung anhand Kurven gleicher Lautstärken nachempfunden. Das Graue Rauschen ist ein solches Rauschen.

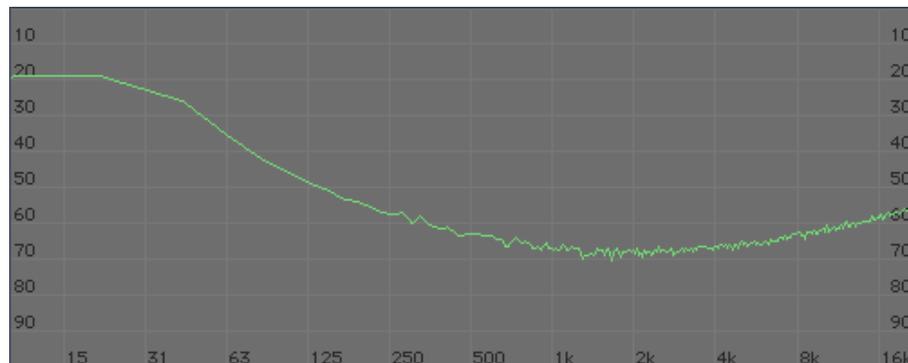


Abb. 23: Energiespektrum des grauen Rauschens

4.5.1 Rauschen eines Kompressors

Neben den technischen Definitionen am Anfang dieser Arbeit, den gewonnenen Kenntnissen über die Wahrnehmung des Rauschens und den möglichen unterschiedlichen Klangfarben lässt sich die Kombination alledem auf die Praxis ausweiten. Bei Betrachten des Rauschspektrums des Fairchild Kompressors lässt sich zuerst keine großen Schlüsse auf die innere Beschaffenheit

des Gerätes schließen. Es sieht wie ein Gemisch aus einem weißen und einem rosa Rauschen aus, also einem im Spektrum nicht so stark abfallenden Rauschen zu hohen Frequenzen hin.

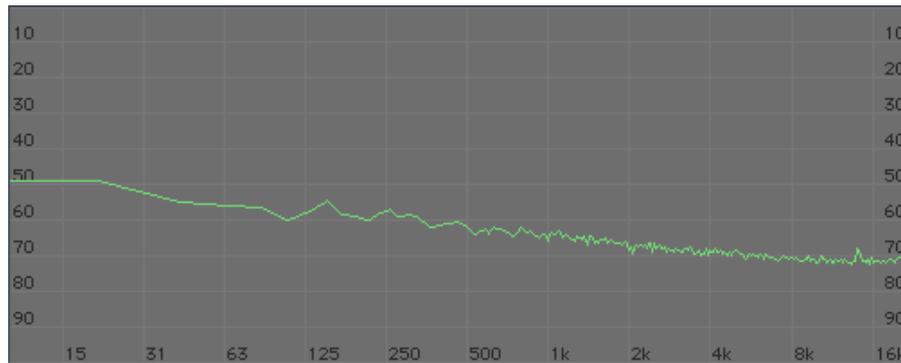


Abb. 24: Energiespektrum des Rauschen des Fairchild Kompressors

Der Schaltplan (im Anhang S.85) gibt weiteren Aufschluss über die einzelnen Rauschanteile. Zu einer Zeit gebaut in der die diskrete Schaltungstechnik noch in den Kinderschuhen steckte ist hier die Röhre das Hauptverstärkerelement. Die Schaltungsrealisierung des Systems gestaltet sich relativ einfach im Aufbau. Lediglich die schon erwähnten Röhren, eine Menge Widerstände, Kondensatoren und Trafos/Übertrager kommen zum Einsatz. Jedes Bauteil trägt seinen Anteil zum Gesamtrauschen des Gerätes bei, der es auch charakteristisch macht. Ein solches Rauschen, definiert als Störgröße und nichtlineare Abweichung des Übertragungssystem unterscheidet sich deutlich in der Wahrnehmung vom „reinen“ Rauschen, also der aus dem Signalgeneratoren erzeugten weißen und rosa Rauschquellen. Es handelt sich um ein zusammengesetztes Rauschen welches, wie auch das aus dem Signalgenerator, über der Zeit schwankt, jedoch sich immer wieder in neuen Verhältnissen berechnet.

Die Röhre als Hauptelement der Schaltung bildet mit dem Schrotrauschen vermutlich den Großteil eines weißen Spektrums. Der weitaus größere Rauschanteil der Röhre entsteht durch die Materialabnutzung, das Funkelrauschen. Bis heute nicht genau definiert hat es jedoch ein unterproportionales Frequenzverhalten, also einen rosa oder einen braunen Anteil. Das durch die Widerstände auftretende thermische- und Stromrauschen weist ein weißes Spektrum vor. Die Rauschquellen der anderen Bauteile sind vernachlässigbar klein, da es sich nur um thermisches Rauschen handelt. Charakteristische Rauschquelle ist beim Fairchild Kompressor also die Röhre. Besonders hervor tritt diese Klangfarbe des Rauschen in den tiefen Frequenzbereichen. Das weiße Spektrum des Gerätes ist daher in der Empfindung nicht relevant. Der dominante tiefe Frequenzanteil steht charakteristisch für das Gerät und verändert sich durch die Materialabhängigkeit des Funkelrauschen mit der Zeit. Aber ob diese Rauschen auch den analogen Charakter vermittelt wird hoffentlich im Hörversuch zur Geltung kommen.

5. Klanggestaltung mit Rauschsignalen

Die Avantgarde der neuen Musik, allen voran der Ausnahmekomponist John Cage, haben es sich zum Ziel gemacht die klassischen Grenzen der Musik zu sprengen. Durch Auflösen bekannter Harmonien und festen Intervallen, die zusammen immer in einer bestimmten Melodienstruktur fusionieren, soll der moderne Mensch die Geräusche der mechanischen und industriellen Realität⁸⁹ in der Musik wieder finden. Musik setzt sich nicht mehr aus Tönen und Klängen zusammen, sondern bildet der all umfassende Bereich des Lärms oder des Rauschens die akustische Vorlage durch dessen organisierte Abbildungen neue Sounds entstehen. Solche Musik schweigt nicht zur Realität. Sie bringt den Sound der Strasse, als Abbildung allem, in den Konzertsaal⁹⁰. Komponisten wie Russolo, Varèse und Cage trieben diese Entwicklung stetig voran. Klassische Kompositionstechniken wurden durch Rauschen aufgelöst⁹¹. Die Rolle des Komponisten wurde so in Frage gestellt, denn die Notenverteilung unterlag einem statistischen Prinzip, dem weißen Rauschen. Verbunden mit dem Image der Rebellen in der Musikszene gibt es solche Reformen auch heute noch. Weg vom klassischen Musikverständnis, hin zur Öffnung des gesamten wahrnehmbaren Spektrums. Denn Rauschen ist ja nichts anderes als alle Information in einem und Musik die geordnete Form davon. Laut Baumann [1995, S. 38] werden durch Lauschen die Klänge im Rauschen strukturiert, geordnet, kreiert, interpretiert, also zu Musik. Um es philosophisch auszudrücken, muss man sich dem Rauschen öffnen damit es vom reinen Störsignal zu Musik oder auch Kunst wird.

Vorangetrieben wurde die privilegiere Position des Rauschens⁹² auch durch die Entwicklung synthetisch erzeugter Klänge und der digitalen Musikproduktion. Der „Noise“-Generator war schon immer ein Teil jedes Synthesizers mit dem dem Signal Natürlichkeit verliehen wird. Die Rauschanteile der rauschbehafteten Geräusche und Klänge werden mit ihm erzeugt und tragen zum Realismus nachgebildeter Instrumente bei. Aber nicht nur eine Revolution gegen das traditionelle wie es im Techno oder IDM (Intelligent Dance Music) stattfindet vollzieht die Grenzverwischung zwischen der Musik und dem Rauschen, auch immer mehr moderne Produktionen spielen mit dem Rauschen und zielen auf eine gewisse Klanggestaltung ab. Als ein Signal mit fast unendlicher enthaltener Information stellt es theoretisch genauso viel Wege bereit es einzusetzen.

Kämpften Toningenieure in den Anfängen der Musikproduktion noch mit dem Rauschen als Feind, ist es heute durch „sterile“ Arbeitsumgebungen und Geräten mit immer besseren Signal-

⁸⁹ Weibel (1995), S. 87

⁹⁰ ebd., S. 86

⁹¹ Sanio (1995), S. 57

⁹² Weibel (1995), S.88

Rausch-Abstand so gut wie aus dem Produktionsprozess verschwunden. Und wenn es dann einmal auftaucht wird sofort das größte Theater darum gemacht. Das es, wenn es aus keinen bekannten Quellen her rührt, psychoakustisch ungewohnt und störend klingt ist mittlerweile klar, jedoch trifft dies auf eine einzig digital entstandene Produktion teilweise auch zu. Es sollte vielmehr versucht werden mit dem Rauschen einen gewissen Klangeindruck zu fördern und Natürlichkeit zu verleihen. Die Möglichkeit, die ein Rauschen bietet sollte einfach genutzt werden.

5.1 Das Gute im Rauschen

Diese Aussage stellt erstmal einen großen Widerspruch da. Nicht nur die Informationstheorie, sondern auch die gesamte Akustik beschreiben das Rauschen als Störgröße, aber es birgt auch eine Menge Potenzial in sich. Bei der Beschreibung der Wahrnehmung von Rauschen wurde festgestellt, dass es auch „angenehme“ Formen von Rauschen geben kann. Dies sind meist natürlich vorkommende Rauschquellen (Meer, Wind, Wasser) die als glattes Spektrum monoton wirken und mit denen man immer etwas bekanntes verbindet, sei es eine Umgebung oder ein Gefühl. Monoton bedeutet aber wie schon bei der Wahrnehmung die Abschaltung des Gehörs durch die Reizüberflutung dessen. Einzelne Signale können nicht separiert werden, weshalb das Gehör sich in die Einbildung flüchtet. Also warum sich diesen Aspekt nicht in der Musik zu Nutze machen um einen bestimmten Klangeindruck zu fördern. Das breite Spektrum mit den darin enthaltenen Möglichkeiten ist das Gute im Rauschen. Allen voran die Unterstützung eines gewissen Klangeindrucks. Aber auch eine Struktur und Ordnung zeugen von einer angenehmen Empfindung die verbundenen Eigenschaften zugrunde liegt und fernab einer gestörten Reizüberflutung des Gehörs. Das gute Rauschen zeichnet sich aus Ausschnitten des Spektrums aus mit deren Klangfarbe eine absichtliche musikalische Intention gefördert werden kann. Ob dabei eine technische Absicht, also ein analoger Charakter vermittelt werden soll oder auf kreativer Ebene z.B. Ruhe mit Wind (rosa Rauschen) erzeugt wird ist irrelevant, es steht immer der Bezug zu einer bekannten Komponenten und dem festen Klangeindruck, der durch die Periodizität gegeben ist, im Vordergrund die das Rauschen angenehmer gestaltet. Der Klangeindruck rauschhafter Klänge und Geräusche, wie sie zum Beispiel als Luftgeräusche bei Blasinstrumenten vorkommen, sind abhängig von ihrem Rauschanteils ohne den die realistische Empfindung und daher der bekannte Eindruck fehlen würde. Jegliche Art von Trommeln, die sich für uns durch die Klangfarbe unterscheiden lassen, ist ein Tongemisch bestehen aus den Tönen mit denen sie schwingen und Rauschanteilen als Artefakte. Auch das bereits erwähnte Rauschen des Gitarrenverstärkers, das unentbehrlich ist und für viele die Trennung des Rauschen als Störsignal von der Information bedeutet, ist durch die starke Verstärkung kleiner Audiosignale unumgänglich. Die verstärkten Artefakte beim Anspielen einer Seite die sich in

einem mitschwingenden Geräusch oder Rauschen äussern bilden genauso die bekannte Komponente eines natürlichen Gitarrenklangs wie das Rauschen des Gitarrenverstärkers in der Musikproduktion selbst.

Man sieht, dass die Akzeptanz des Rauschens in diesen Klangquellen vorhanden ist und eine bestimmte Intention fördert, nämlich die realistische Abbildung. Die Definition eines Störsignals, dass ein Signal in seinem Informationsfluss behindert und verdeckt, also ein schlechtes Rauschen bildet, ist nicht gegeben. Das vorhandene Rauschen wird nicht beseitigt, sondern als ein fester Teil des Gesamtklangs angesehen. Mit diesem Wissen ergeben sich in der Klanggestaltung mit Rauschsignalen ganz neue Möglichkeiten zum variablen Einsatz von Rauschen. Bekannte Verbindungen aus den guten Eigenschaften des Rauschens verhelfen trockenen Signalen zu einer natürlicheren Erscheinung und verleihen einen bekannten Charakter. Besonders die tief klingende Rauschfarbe des rosa Rauschens findet sich oft in der Klanggestaltung wieder. Dieses zwischen Ordnung und Chaos angesiedelte Rauschen gilt als das interessanteste Rauschen mit dem pragmatischsten Bezug zur Musik⁹³. Am interessantesten klingt für uns etwas das wir zwar kennen, aber uns auch Spielraum für Neues lässt. Wir kennen das rosa Rauschen als durch sein spektralen Verlauf angenehmeres Rauschen, das durch seine Beschneidung des Spektrums in einen anderen Spielraum wechselt. Als schmalbandiges Signal, welches sogar eine feste Tonhöhe aufweist, werden viele weitere Alternationen zum Einsatz als Gestaltungsmittel geboten. Theoretisch ist der Ton einer Flöte nichts anderes als die durch das Rohr geschnittene Luft. Die Luft verliert seinen Rauschcharakter⁹⁴ und wird dadurch immer schmaler, d.h. sie klingt als Ton. Als fester Bestandteil des guten Rauschens in der natürlichen Intention wird dieses auch nicht bewusst und vor allem subjektiv unangenehm wahrgenommen. Ein störender Charakter kommt nicht in den Sinn. Jedoch muss beim Einsatz des Rauschens als Gestaltungsmittel, besonders als länger anhaltender Ton, darauf geachtet werden, dass dieses die Wahrnehmung nicht überreizt. Die Überreizung und andauernde fordernde Aufmerksamkeit würde wieder als Störung in Erscheinung treten, wodurch die Empfindung der Musik leidet. Das Rauschen fällt in die Kategorie Lärm, was nicht Sinn und Zweck seines bewussten Einsatz als Gestaltungsmittel ist, außer natürlich es wurde so gewollt. Deswegen sollte eher, sofern die Intention nicht erreicht wird, darauf verzichtet werden, bevor man sich durch Artefakte und aggressives Rauschen die Stimmung des Songs zersört. Ein Versuch ist es aber Wert, denn bei leisen, eventuell sogar rhythmischen Rauschpassagen kann der Charme eines Musikstückes enorm gesteigert werden.

Würde man das gute Rauschen näher definieren, handelt es sich eigentlich immer um ein Rauschen mit definierter Klangfarbe und spektraler Kontinuität die in einem bekannten oder

⁹³ s. Aufsatz von Clarke / Voss „1/f-Rauschen in der Musik“ (1995), S. 113

⁹⁴ Höldrich (1995), S. 143

akzeptierten Maße vorhanden sind. Aggressive Reizfaktoren im wahrnehmbaren Empfindlichkeitsbereich des menschlichen Gehörs sind nicht stark vertreten. Bekannte Rauschquellen bilden gutes Rauschen, während bekannte Anhaltspunkte mit verbundenen Emotionen und geordnete Struktur das gute im Rauschen sind. Jedoch gibt es einen weiteren positiven Aspekt am Rauschen. Als das Gute am Rauschen kann durch die Überlagerung des Signals mit einem Rauschen verbundene Kompression gesehen werden. Der zur Verfügung stehende Dynamikumfang eines Aufnahme- oder musikalischen Bearbeitungssystems wird durch den Signal-Rausch-Abstand definiert. Dieser beschreibt das zehnfach - wie in der Audiotechnik durch die Größenordnung so übliche - logarithmierte Verhältnis des maximalen Pegels, also der Übersteuerungsgrenze, zu dem Grundrauschen des Systems. Definiert ist das Grundrauschen als die Schwelle, bei der leise Signale verdeckt werden. Angenommen, ein System hätte 100 dB Dynamik, d.h. das Grundrauschen liegt bei -100 dB und es wird digital mit einer maximalen Obergrenze von 0 dBFS aufgezeichnet, und ein rosa Rauschen wird mit einem Pegel von -50 dB in die Mischung gefahren, würde der Dynamikumfang nur noch 50 dB betragen, da leisere Signale als - 50 dB verdeckt werden würden. Eigentlich ist daran nichts positives zu finden, da ja die nutzbare Dynamik nicht voll ausgeschöpft werden kann. Auf der Summe des gesamten Mixes wäre dies schon eine enorme Einschränkung, aber soll z.B. eine Schlagzeuggruppe durch ein Rauschen voluminöser wirken, steigert sich zusätzlich der RMS-Pegel, wodurch eine Einschränkung der Dynamik resultiert. Dies kann, muss aber nicht als positiver Aspekt einer Klanggestaltung mit Rauschsignalen gesehen werden.

Das gute Rauschen fasst sich also durch drei Faktoren zusammen, der Form des Rauschens die sich in einer natürlichen Abbildung widerspiegelt, der Klangfarbe durch die ein Bezug zu etwas Bekanntem und einer Ordnung assoziiert wird und die Amplitude des Rauschens. Diese setzt einerseits die „Kompressionsrate“ fest, andererseits ist sie aber auch ein Merkmal dafür, ob das Rauschen subjektiv angenehm empfunden wird oder eine lärmende Reizüberflutung stattfindet. Alles ist Sache des Pegels. Sobald, um noch einmal auf die Wahrnehmung zurück zu kommen, beide Gehirnhälften sich die Arbeit teilen, also die linke die Rhythmik und die rechte die Melodie verarbeitet, wird Musik entspannend. Beide Seiten sollten also vom Rauschen gleichmässig gefüttert werden, damit die Klanggestaltung nicht in einer Lärmgestaltung ausartet. Struktur als deterministische und dadurch geordnete Form des Rauschens übernimmt die linke Gehirnhälfte und die Klangfarbe als kreativen und melodiösen Input die rechte Gehirnhälfte. Jedoch ist das alles nur die Theorie und wie wir noch sehen werden sind der Klanggestaltung mit Rauschsignalen keine Grenzen gesetzt. Alles ist erlaubt solange es sich gut anhört.

5.2 Betone die Schwachstellen

Es kann immer wieder vorkommen das eine Signalquelle im Arbeitsprozess rauscht. Nun entstehen zwei Möglichkeiten wie fortgefahren werden kann. Die erste und natürlich, falls möglich, einfachste Art ist das Signal nochmals aufzunehmen. So tut man sich es natürlich leicht, verschenkt aber potenzielle Gestaltungsmöglichkeiten. Als reiner Mixingenieur ist man aber nicht verantwortlich für die Aufnahmen und bekommt diese fertig zugeschickt. In Analogie zur nochmaligen Aufnahme, die hierbei technisch und wirtschaftlich nicht realisierbar ist, kann dafür versucht werden mit De-noisern, also Mittel zur Rauschbeseitigung, das Rauschen zu eliminieren. Durch diesen harten Eingriff in die Originalität des Ausgangsmaterial resultiert auch immer eine Veränderung des Klangcharakters. Solche Restaurationstools arbeiten auch nie linear, also liegt es nahe das neue Artefakte sich zum Originalmaterial dazu addieren. Die zweite und interessantere Möglichkeit, neben der nochmaligen Aufnahme oder der Bearbeitung, resultiert aus der Aussage von Brian Eno: „Emphasize the flaws!“⁹⁵ (Betone die Schwachstellen). Hannes Bieger deutete diesen Ausdruck in seinem Artikel „Klanggestaltung mit Rauschsignalen“ [06/2008, S.100] schon als eine Art Aufforderung mit dem Rauschen in der Spur kreativ zu werden. Je nach Musikrichtung, bei der es im Gesamtkontext ganz hilfreich sein kann um die Stimmung des Songs zu unterstützen, kann es probiert werden. Besonders der Jazz macht sich das Rauschen zu Nutze. Als eines der kreativsten und freiesten Musikkünste verstand sich der Jazz schon immer gegen die geordneten Strukturen vorzugehen. Das diskrete starre Taktmuster sollte eliminiert werden und mit dem Swing die Improvisation eine größere Rolle zukommen⁹⁶. Und was eignete sich besser zur Auflösung jeder Form und Struktur als die Form des Rauschens. Durchgehend rauschende Becken die mit dem Besen angespielt werden, lösen sich in ein „rauschendes, schwingendes Muster“⁹⁷ auf. Das die Aufnahmen zur damaligen Zeit zusätzlich durch die zur Verfügung stehenden Produktionsmittel rauschten, machte den weiteren Charme aus. Es war keine Schwachstelle, als dass das Rauschen angesehen wurde, sondern stand es als Betonung für den bekannten Sound damaliger und auch noch heutiger Zeit als Kontrast zur europäischen klassischen Musik. Die Klangfarbe des Rauschens als durchgehend weißes Spektrum, resultiert in einem hellen, unordentlichen und etwas kribbeligen Charakter der das Extrem zur Ordnung und dem melodiosen tieferen Klangbild der klassischen Musik bildet. Rauschen als Gestaltungsmittel löste hier das klassische diskrete Muster in ein improvisiertes schwingendes Muster auf.

⁹⁵ Brian Eno aus „Oblique Strategies“, zitiert von Hannes Bieger (06/2008), S. 100

⁹⁶ Heidenreich (1995), S. 21

⁹⁷ ebd., S. 22

Mit der Klangfarbe als das bedeutendste Merkmal des Rauschens lässt sich der Klangeindruck eines Musikstücks also modellieren. Die Schwachstelle wird zum Informationsträger. Das Rauschen der rauschenden Spur kann den Gesamtklang in der Mischung helfen einen anderen Charakter zu bekommen. Die Verbundenheit verschiedener Rauschfarben mit einem bestimmten Gefühl oder Bekanntheitsgrad kann diese Emotionen auch in einem Song reflektieren. Melancholie durch dunkles rosa Rauschen, dessen Klangfarbe mit der Natürlichkeit des Windes oder dem Meer in Verbindung steht und nachdenklich wirkt, kann durch den Noise-Generator des Synthesizers in einer flächigen Passage hinzugemischt worden sein. Auch kann ein ruhiger Vocalpart durch einen stark eingestellten Output eines analogen Kompressors einer Aufnahme verwechselt sein, würde aber die Melancholie und den Charme des Songs mit einem entstehenden flüsternden Charakter unterstützen. Oder das Unbekannte, welches ein Faktor für das störende Rauschen ist, kann in der Musik durch den Einsatz dessen wie in dem Lärm der Stadt unwohl sein und ständige versuchte Interpretationsgabe auslösen. Überall passiert etwas. Klar ist der Einsatz von Lärm eher selten, aber dennoch gibt es Musikrichtungen die auf solch einen Effekt abzielen. Dagegen kann das, bereits in der Wahrnehmung akzeptierte, omnipräsente aufdringliche weiße Rauschen des Gitarrenverstärkers, das zusätzlich durch Effektpedale mehr Rauschpegel gewinnt, durch die spektrale Zusammensetzung die Reizung des empfindlichen Hörbereichs dafür verwendet werden, eine aggressive und temporeiche Grundstimmung eines Songs zu stützen. Eine gefühlte additive Obertonstruktur oder eine durch die Emotionalisierung des besonders empfindlichen Wahrnehmungsbereichs des menschlichen Ohrs gesteigerte Präsenz können daraus resultieren. Das weiße Rauschen des Gitarrenverstärkers entspricht zwangsläufig zwar nicht den Voraussetzungen einer angenehmen Klanggestaltung aber überwiegt hier die Intention und daher die bekannte Form. Das entstehende Klangbild dominiert die Analyse die gewöhnlich aus einer versuchten Tonhöhenfindung resultiert.

Aus dem anfänglichen Problem des Rauschens zeichnet sich nun eine Intention ab, die je nach der Verbindung des Rauschens auf der rauschbehafteten Spur mit einem Gefühl, einen gewissen Klangeindruck fördert. Die Absicht muss erkennbar sein, denn wer nur das Rauschen hört stört sich daran. Für wen aber der Eindruck wahrnehmbar ist, der lässt sich nicht daran stören und erkennt Struktur.

5.3 Rauschen als Gestaltungsmittel

Die Einsatzmöglichkeiten sind vielseitig. Die Verbundenheit zu den drei Voraussetzungen einer angenehmen und effektiven Klanggestaltung sind wie gesagt nur Richtlinien. Grenzen sind keine gesetzt. Jeder entscheidet für sich was als angenehm empfunden wird und ob sich der gewünschte Effekt einstellt. Genau aus diesem Grund liefern die nachfolgend erwähnten Beispiele nur einen Anreiz kreativ zu werden. Schliesslich handelt es sich bei der Arbeit mit dem Rauschen, wie das Rauschen selbst, um einen gigantischen Spielraum.

5.3.1 Ambience Effekt durch Rauschen

Räume rauschen. Selbst ein leerer stiller Raum ist nie komplett ruhig. Das Rauschen des Raumes setzt sich dabei immer aus einer Überlagerung vieler unabhängiger Einzelereignisse⁹⁸ zusammen. Mehrere Faktoren, neben der Molekularbewegung also thermischen Rauschen, spielen auch Faktoren wie das Brummen und Rauschen von Lampen, elektronischen Geräten und Geräusche der Heizung eine Rolle, die sich als ein großer Geräuschteppich miteinander verbinden. Dies alles ist neben dem akustischen Verhalten des Raumes charakteristisch für diesen. Selbst wenn man glaubt ihn nicht zu hören macht er sich auf der Aufnahme bemerkbar. Sei es mit der ihm verbundenen Räumlichkeit eines aufgenommenen Signals oder durch übermässige Verstärkung einzelner Spuren, durch die das Rauschen hochgezogen und dadurch akustisch präsent werden würde. Als großes Merkmal ist die Räumlichkeit verantwortlich für eine realistische Aufnahme von der man weiß, dass hierbei mit echten Instrumenten aufgenommen wurde. Durch diese Kategorisierung einer Aufnahme assoziiert der Hörer ein natürliches Klangbild und dies steigert auch den Charme der Aufnahme. Jedoch können es sich nicht alle Musikproduzenten, allen voran die Amateure, leisten mit echten Musikern und Instrumenten aufzunehmen. Hier wird auf den virtuellen Musiker zurückgegriffen. Die elektronische Musik bildet die Pionierstellung, denn nirgends wird musikalisch mehr programmiert und „trocken“ gearbeitet als hier. Fast die komplette Produktion geschieht digital im Rechner. Plug-Ins jeglicher Art, die Nachbauten bekannter Synthesizer, Gitarrenverstärker oder sogar kompletten Schlagzeugen zur Verfügung stellen, erlauben selbst dem Unerfahrensten mit den einfachsten Mitteln Musik zu machen.

Die natürliche Räumlichkeit, die immer ein Übersprechen einzelner Mikrofone bei der Aufnahme mit sich bringt, gibt es im Rechner jedoch nicht. Einzelne Drums sind meistens an ein starres Taktmuster ausgerichtet und bestehen aus Einzelsamples. Die Kick auf der 1, Snare auf der 2, Kick auf 3 und Snare auf 4 usw. Doch was befindet sich neben der eventuellen Hi-Hat

⁹⁸ Höldrich (1995), S. 140

dazwischen? Genau, nichts. Vollkommende Stille. Zwar haben wir festgestellt das es vollkommende Stille nicht geben kann, da immer ein Rauschen, sei es noch so minimal, präsent ist, doch ist dies eine Tatsache der analogen Welt. Hier in der rechnergestützten digitalen Welt bedeutet Stille wirklich Stille. Minus unendliche Lautstärke, komplette Systemdynamik oder einfach ein Signal mit keiner Auflösung da kein Signal vorhanden.

Im Gegensatz dazu hat ein mit Mikrofonen aufgenommenes Schlagzeug auf jedem Mikrofon einen Raumanteil und das Übersprechen anderer Trommeln mit darauf. Das „Fleisch“ zwischen den Schlägen, der ganze Zusammenhalt der das Schlagzeugspiel als Gesamtes rundes darstellt, wird durch den Raumanteil repräsentiert. Der digitale Loop klingt durch das fehlende repräsentative etwas zwischen den Schlägen daher abgehackt und nicht so schön rund. Die Homogenität geht verloren. Um das „Fleisch“ wieder aufzuholen und dadurch den natürlichen Eindruck eines digital programmierten Loop in seiner Homogenität zu stärken, kann ein Rauschen eingesetzt werden. Das Rauschen des Raumes zwischen den Schlägen kann bei den Einzelsamples einen runderen Gesamteindruck bewirken und schweißt diese zusammen. Ambience wird künstlich erschaffen und sorgt dafür dass die Einzelsamples zu einem homogenen Klangeindruck zusammen wachsen. Mit dem Rauschen auf der Gruppenspur des programmierten Schlagzeugs bekommen die Samples mehr Zusammenhalt und werden durch die gefühlte „Komprimierung“ zusammen geklebt.

Durch Beachtung der Voraussetzungen für eine angenehme Klanggestaltung mit Rauschen kann dieser Effekt, zumindest in der Theorie, erzielt werden. Es klingt schlüssig dass ein nicht zu lautes, angenehmes, am besten rosa Rauschen die Lücken zwischen den Schlägen füllt und die Samples dadurch einen runderen Groove erzeugen lässt. Theoretisch könnte ein Rauschen über einen Kompressor getriggert werden. Die Bassdrum und Snare würden das Triggersignal liefern und jedes mal bei erscheinen das Rauschen im Pegel vermindern. So hätte man zwischen den Schlägen etwas, nämlich Rauschen. Aber um diesen Effekt näher zu betrachten und vor allem in der Praxis zu testen, diente der zweite Hörversuch dieser Arbeit.

5.3.2 Rauschen als Bezug zur Analogtechnik

In der Audiotechnik geht nichts über die gute alte Analogtechnik. Trotz ihrer Nachteile, erlebt diese zur Zeit eine Renaissance. Studios brüsten sich mit dem vorhandenen analogen Equipment. Seien es Effektgeräte, Mikrofone oder das Herzstück eines Studio, das Mischpult. Analoge Summierer erleben ihre Wiederauferstehung, denn all diesen Geräten wird eine Sache vorausgesagt. Die analoge Wärme, also den besonderen Klangcharakter den sie mit sich bringen. Druckvoll und Warm sind das Merkmal des analogen extrem großen Headroom. Aber was macht die analoge Wärme wirklich warm? Eine kurze Betrachtung auf die analoge Signalverarbeitung sollte Ausschluss darüber geben. Ganz einfach gesagt liegt es an den

nichtlinearitäten des Übertragungssystems. Durch Faktoren der Bauteile, wie die Alterung und Toleranz entstehen Abweichungen vom Soll, die sich als Verzerrungen bemerkbar machen. Diese Bauteile bringen aber nicht nur Verzerrungen, sondern auch Rauschen mit sich. Also müsste theoretisch auch das Rauschen ein Faktor für die Beschreibung analoger Wärme sein. Häufig zeigt sich, dass bei Aufnahmen die auch heutzutage komplett analog gefahren werden, d.h. mit Bandmaschine aufgenommen und nur mit analogen Geräten bearbeitet wird, der Charme der Aufnahmen sich auch durch das Rauschen bemerkbar macht. Da dieses aber in Anlehnung an Aufnahmen der 60er Jahre in Verbindung gebracht wird, ist man an das repräsentative Rauschen damaliger Aufnahmen einfach gewohnt und wird deshalb „überhört“, es ist einfach da. Das Rauschen fällt in die Kategorie der bekannten Verbundenheit, also der Klangfarbe. Das es sich bei den Rauschen der Geräte zum Großteil um rosa Rauschen handelt ist ein weiterer Aspekt der diese Rauschen angenehmer empfinden lässt. Da die meisten analogen Effektgeräte aus Halbleitern wie Röhren, Transistoren oder OPs bestehen und das Rauschen dessen hauptsächlich ein unterproportionales Verhältnis aufweisen, fällt das Rauschen dieser genau in die Kategorie des rosa Rauschens. Das heißt, natürlich rauscht ein analoges Gerät. Überall, wo mit Strom Musik gemacht wird tritt Rauschen auf.⁹⁹ Eigentlich sollte dann ein Signal, das mit einem Rauschen unterlegt wurde, analoger klingen. Besonders digitalen Produktion, die nur im Rechner entstanden sind könnte, dadurch mehr Substanz gegeben werden. Einen Versuch dies mit Rauschen zu erreichen ist es allemal Wert. In Anlehnung an die Voraussetzungen der Klanggestaltung mit Rauschen sollte jedoch darauf geachtet werden, dass das Signal nicht verunstaltet und verdeckt wird. Ob sich der gewünschte Effekt einstellt soll durch den Hörversuch aufgezeigt werden.

5.3.3 Realistische Trommelgeräusche

Um das Rauschen in einem realistischen Kontext als Gestaltungsmittel einzusetzen bedarf es der natürlichen Abbildung. Synthetisch erzeugten Drums oder Snaredrums fehlt meist jegliche mit dem Objekt verbundene Klangfarbe. Bassdrums haben vorwiegend nur einen Bassanteil, während sich die synthetische Snare durch einen fehlenden Snareteppich auszeichnet. Rauschen verhilft in diesen Fällen die Klangfarbe mit seinen Anteilen zu fördern, damit der realistische Klangeindruck zunimmt. Am besten eignet sich hierbei der Einsatz von weißem Rauschen, da dies über alle Frequenzbereiche die gleiche Energiedichte besitzt. Gesteuert wird das Rauschen durch ein Gate mit Sidechain Eingang. Jedes mal, beim Erklingen der Bassdrum oder der Snare, öffnet das Gate und lässt, je nach Einstellung, für die Dauer des Tones das Rauschen durch. Um den Effekt zu verstärken kann das Rauschen auch schmalbandig gefiltert werden um nur in einem bestimmten Frequenzbereich zu wirken. Durch diese Rauschanteile

⁹⁹ Bieger (05/2008), S. 100

bekommt die Snare ihren fehlenden Teppich und die Bassdrum mehr Attack. Die Abbildung wird realistischer, da diese Geräusche sich in Wirklichkeit in ihrer Klangfarbe auch aus einem Ton mit Rauschanteilen zusammensetzen.

5.4 Beispiele vom Einsatz des Rauschens in der Praxis

Wie man sieht gibt es viele Einsätze von Rauschen als Gestaltungsmittel um gewisse Intentionen zu fördern. Wer sich dem Rauschen kreativ öffnet entdeckt möglicherweise noch mehr Wege dies einzusetzen. Grenzen gibt es keine und erlaubt ist alles was gefällt. Die von mir aufgestellten Voraussetzungen für den richtigen Einsatz bilden lediglich einen Leitfaden, nach dem man zumindest nichts falsch machen kann.

Folgende Beispiele, als eine Anlehnung aus dem Artikel von Hannes Bieger [06/2008, S. 101f], sollen den Einsatz von Rauschen in der Praxis aufzeigen, wo das Rauschen bewusst zum Klangcharakter eines Songs oder Albums gehört.

Lenny Kravitz - Sister

Als Gitarrenmusik lässt sich die Musik von Lenny Kravitz schon einordnen, weshalb das Rauschen der Gitarrenverstärker allgegenwärtig sein müsste. Müsste deshalb, weil normalerweise in der Mischung die einzelnen Gitarrenspuren, solange sich kein Audiomaterial darauf befindet, stumm geschaltet werden. Erst wenn die Gitarre spielt geht auch die Spur mit auf. Hier wurde jedoch schon von Beginn an die Spur offen gelassen. Im ersten Part des Songs spielt noch keine Gitarre auf der betroffenen Spur, lediglich dröhnt ein Rauschen aus der linken Lautsprecherseite. Ohne jeglichen Bezug zur Realität erzeugt es ein Unwohlsein und ist die große Unbekannte die man einzuordnen versucht. Denn man hat noch keine Ahnung woher dieses Rauschen kommt und was die Intention dahinter ist. Reizüberflutung steigert die Aufmerksamkeit und kann der Grundstimmung des Songs in der Vermittlung unterstützen. Erst in der zweiten Strophe erscheint auf der linken Seite die Gitarre, die dem Zuhörer auch gleichzeitig die Auflösung der Unbekannten vermittelt. Die reizüberfluteten Signale müssen nicht mehr zugeordnet werden. Der bekannte Bezug ist da, weshalb das Rauschen sekundär und damit ausgeblendet wird.

Beth Gibbons - Out Of Season

Was dieses Album besonders macht ist nicht der Einsatz vom Rauschen an sich, sondern der ganze Charme den es versprüht. Das Album wurde komplett mit Livemusikern eingespielt und

auch durchgehend mit analogen Mitteln produziert. Ein ständiges Grundrauschen, wie man es von älteren Produktionen kennt, ist durchgehend präsent. Als störend gilt dies jedoch nicht. Vielmehr wird es ausgeblendet, da es einen bekannten Bezug zu alten Aufnahmen herstellt und auch nur minimal vertreten ist. Musikalisch angesiedelt ist dieses Album im Folk und wird damit mit einer älteren, technisch nicht so weit fortgeschrittenen Entwicklung verbunden, wo das Rauschen „*einfach da war*“.

Portishead - Portishead

Portishead stehen für experimentelle Musik die grenzenlos arbeitet. Meist melancholisch in der Klangfarbe wird hier wunderbar mit dunklem Rauschen als Stimmungsträger gearbeitet. Auch mit einem anderen Aspekt der Definition von Klanggestaltung mit Rauschen setzt sich dieses Album auseinander. Nicht das Rauschen als einzelnes Signal, wie man es bereits kennt, steht für das Rauschen, sondern bildet auch der Zusammenklang vieler einzelner Geräusche ein stetig vertretenes Geräuschbild der diese Produktion auszeichnet. In dem Bereich des Samplings mit dem von Vinyl aufgenommenen Material resultierten immer schon Nebengeräusche wie das Plattenknistern, Rauschen oder auch Brummen das hier ständig den Klangeindruck fördert und immer wieder den Mittelpunkt bezieht. Portishead zeigen an diesem Album auf, wie mit anderen Stilikonen Interesse und Intention gefördert werden.

Was Portishead und Beth Gibbons schon damals durch die Präsenz von Rauschen erreicht haben, zeigt sich heutzutage in der musikalische Weiterentwicklung elektronischer Musik. Die Avantgarde zeitgenössischer elektronischer Musik, allen voran das englische Label WARP¹⁰⁰, bildet sich aus einem definierten Lo-Fi (niedrige Qualität) Sound aus. Aus mehreren Musikrichtungen kommend und daher genreübergreifend steht ein Bezug zum früheren Trip-Hop, bis auf den melancholischen Klangcharakter, am nächsten. Neben der technisch modernen Produktion rauscht und knistert es zwar, dies macht aber den Klangeindruck so besonders. Verspielte Sounds die Harmoniestrukturen auflösen, werden genauso als Rauschen angesehen, als teilweise schlechtes Samplmaterial das benutzt wird. Ein eventuell vorkommendes rhythmisches Rauschen, das in einer Art Propellergeräusch immer lauter und schneller wird und dadurch eine Steigerung zu einem Höhepunkt erreichen will, gepaart mit einem tief dröhnenden synthetischen Bass zeigt die Grenzverwischung in der neuen Musik auf, in der alles klingt was aus Schallwellen besteht. Musik wird zu einem Sounddesign. Störsignale stehen neben geordneten musikalischen Klängen.

¹⁰⁰ s. <http://warp.net/>: Artist wie Aphex Twin, Rustie, Flying Lotus usw (Zugriff am 12.03.2010)

6. Hörversuche

Nicht alle Thesen, die es heißt in der Theorie aufzustellen, treffen in der Praxis wirklich zu. Um diese zu bekräftigen und daher auf ihre Tauglichkeit hin zu untersuchen wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit zwei Hörversuche unternommen. Zum einen sollte die Wahrnehmung von Rauschen in Bezug auf die Rauschfarben untersucht werden, um die verschiedenen Rauscharten nach ihrer theoretischen Definition auf ihre Empfindung her zu betrachten. Zum anderen wurde ein Beispiel zum Einsatz des Rauschens als Klanggestaltungsmittel untersucht, nämlich der Ambience Effekt. Des Weiteren wurde der Effekt des Rauschens als Faktor für analoge Wärme und der Dynamikverringering in den Versuchen mit untersucht.

6.1 Vorbereitungen

Für den Hörversuch wurden vorwiegend Leute eingeladen die bereits Erfahrung im Audiobereich haben. Dies war wichtig, handelte es sich bei der Beurteilung der Klangbeispiele meist um geringe Unterscheidungen und schwer wahrnehmbare Faktoren. Wäre das Rauschen folglich so laut dass es deutlich wahrnehmbar gewesen wäre, würde der gewünschte unterschwellige Effekt nicht eintreffen. Die Wahrnehmung des Rauschens sollte unterbewusst für die Probanden getestet werden, d.h. die Wahrnehmung galt primär nicht dem Rauschen, sondern dem Pseudothema das den Probanden mitgeteilt wurde „Klangliche Unterschiede analoger Schaltungen in Abhängigkeit derer Bauteile“. Durch die Annahme dieses Themas sollte auch erreicht werden, dass die Versuchsteilnehmer immer mit einem gewissen Rauschen rechneten und daher nicht in jeder Bemerkung das Kommentar „Aufnahme rauscht“ hinterließen.

Der erste Hörversuch der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde untersuchte die Wirkung ob durch Rauschen ein trockenes Signal Räumlichkeit gewinnt und zu einem homogeneren Groove zusammenwächst. Um die maximale Versuchsdauer nicht zu überschreiten sollte in diesem Zusammenhang auch die empfundene analoge „Wärme“ beurteilt werden. Als Vorlage diente hier ein relativ simpler Schlagzeugloop, den ich mit Alexander Lengle im AM-Tonstudio der Hochschule der Medien aufgenommen habe. Durch die einfache Struktur des Schlagzeugloops (4 Takte Kick, Snare, Hi-Hat und Tomfill am Ende) und dem langsameren Tempo (90 Bpm), entstanden lange Pausen zwischen den Schlägen die einen guten Raumeindruck zuließen. Bei der Nachbearbeitung der Schlagzeugaufnahme für den Hörversuchs wurde mit Bedacht und ziemlich diskret vorgegangen um den natürlichen Klangeindruck zu erhalten. Die Mischung hielt sich einfach und durch den Einsatz der

klangneutralen Pro Tools Standard Plug-Ins wurde die Klangverfälschung gering gehalten. „Kosmetische“ Eingriffe die den Schlagzeugklang unterstützen galt es einzusetzen. Auch die klangneutralen Kompressoren der Pro Tools Plug-In Serie wurde nur zum Ausgleich des dynamischen Spiels und zur Hervorhebung des Raumklangs in den ruhigen Passagen eingesetzt. Für den Versuch wurde zusätzlich noch das editierte Schlagzeug benötigt um nur die Einzelschläge ohne Rauminformation zu erhalten. Alle Raumanteile wurden dabei herausgeschnitten, wobei darauf geachtet wurde dass das Sample im Ausklang nicht zu stark beschnitten wurde. Dadurch entstand der Eindruck eines stark gegateten Schlagzeugs und durch das fehlen der Raummikrofone und der Overheads ging auch der Stereoeindruck verloren.

Der Untersuchungsgegenstand des zweiten Versuchs setzte sich mit dem Punkt der Wahrnehmung der einzelnen Rauschfarben auseinander. Bis auf die Wirkung von weißem und rosa Rauschen gibt es keine genauen Beschreibungen wie diese sich auf das menschliche Empfinden auswirken, jedoch kann durch die Betrachtung des Spektrums und dem bereits herangeführten Verständnis der Wahrnehmung von Rauschen schon vorab eine theoretische Aussage getroffen werden. Hierbei wurde ein digital produzierter Loop¹⁰¹ mit den verschiedenen Rauschfarben unterlegt und Aspekte des Klangcharakters wie die empfundene Annehmbarkeit und den voluminösen Charakter in Hinsicht auf die Dynamik untersucht. Untersuchungsgegenstand war die Erwartung ob die Rauschfarben auch in der Musik die Wahrnehmung erfüllen, mit der sie definiert und theoretisch beschrieben wurden.

Wegen der unterschiedlichen Energieverteilung im Spektrum mussten die Rauschpegel für die Rauschfarben nach dem subjektiven Empfinden für jeden einzelne Rauschfarbe eingestellt werden. Hierbei wurde darauf geachtet ein Mittelmaß zu finden bei dem das Rauschen gerade so wahrgenommen werden konnte und sich nicht in den Vordergrund drängte. Anhand von Vorversuchen die durchgeführt wurden zeigte sich, dass die Unterscheidung der einzelnen Klangbeispiele sehr schwer fiel. Für mich als Versuchsleiter und resultierender, gesteigerter Empfindlichkeit gegenüber dem Rauschen konnten die Rauschpegel gut vernommen werden. Aber ohne das Wissen, dass es sich um Rauschen handelt und deshalb keiner direkten Aufmerksamkeit unterlagen, waren die Pegel zu gering. Aus dieser Empfindung resultierten die finalen Pegel für den Hörversuch. Die folgende Tabelle zeigt die Reihenfolge und den Inhalt der einzelnen Soundbeispiele.

¹⁰¹ Kurzer Ausschnitt aus dem Beat „Ohne Uns“ von Robinson Cruise Flow (John Robinson)

Hörversuch 1: Rauschen als Gestaltungsmittel - Ambience Effekt und Analoge „Wärme“

Nr.	Inhalt	Rauschpegel
Loop 1	Editiertes Schlagzeug / Einzelschläge ohne Raumeindruck	---
Loop 2	Editiertes Schlagzeug mit rosa Rauschen unterlegt	- 53 dB
Loop 3	Editiertes Schlagzeug mit grauem Rauschen unterlegt	- 48 dB
Loop 4	Editiertes Schlagzeug mit dem Rauschen des Fairchild Kompressors unterlegt	- 49 dB
Loop 5	Original aufgenommener Schlagzeugloop	---
Loop 6	Originaler Schlagzeugloop ohne Raummikrofone	---
Loop 7	Originaler Schlagzeugloop ohne Raummikrofone mit rosa Rauschen	- 49 dB

Hörversuch 2: Wahrnehmung unterschiedlicher Rauschfarben und Auswirkung auf gefühlte Kompression

Nr.	Inhalt	Rauschpegel
Loop 1	Originalloop	---
Loop 2	Loop mit weißem Rauschen unterlegt	- 42 dB
Loop 3	Loop mit rosa Rauschen unterlegt	- 37 dB
Loop 4	Loop mit braunem Rauschen unterlegt	+ 2 dB
Loop 5	Loop mit blauen Rauschen unterlegt	- 25 dB
Loop 6	Loop mit violetter Rauschen unterlegt	- 40 dB
Loop 7	Loop mit grauem Rauschen unterlegt	- 40 dB
Loop 8	Loop mit Rauschen des UREI 1176 Kompressors unterlegt	- 40 dB
Loop 9	Loop mit Rauschen des Fairchild Kompressors unterlegt	- - 32 dB

Neben der Bearbeitung der einzelnen Soundbeispielen galt es ein geeignetes Beurteilungsverfahren zu ermitteln, mit dem sich das gewünschte Resultat erzielen lässt. Da nicht die Unterschiede zwischen den einzelnen Soundbeispielen relevant waren, sondern allein die subjektive Wahrnehmung und Kategorisierung jedes einzelnen Klangbeispiels im Vordergrund stand, eignete sich am besten das Prinzip der Kategorialen Bewertung¹⁰². Dabei wird der vorgespielte Loop anhand eines Adjektivs das einer subjektiven Empfindung entspricht kategorisiert und bewertet. Die Einteilung wird auf einer fünfstufigen Skala vorgenommen, damit nicht nur beide Extreme und die neutrale Mitte bewertet werden können. Eine Auswertung dieser Beurteilung würde sich in einer Reihenfolge entwickeln die dem reinen subjektiven Empfinden entspricht.

¹⁰² HEAD Application Note (2005), S. 3

6.2 Versuchsdurchführung

Austragungsort des Hörversuchs war die Regie C des AM-Tonstudios der Hochschule der Medien, da sich dort besonders die Nähe zu den Abhörlautsprechern positiv zeigte. Ursprünglich sollte der Versuch in der Regie B stattfinden, aber das Grundrauschen der Monitorsysteme war zu präsent, so dass die Einordnung der Hörbeispiele nicht detailgetreu vonstatten gegangen wäre. Als Abhörlautsprecher wurden die ADAM S1A verwendet, da diese den Klang am neutralsten wiedergaben und bereits die Einstellung der verschiedenen Rauschpegel auf diesen stattfand. Platziert wurden die Probanden im Sweet-Spot, damit keine Phasenunterschiede stattfinden konnten und das Rauschen dort am deutlichsten vernommen wurde.

Vor dem Beginn des Hörversuchs wurde dem Teilnehmer eine genaue Einweisung zum Thema, zur Beurteilung und dem Versuchsablauf gegeben. Zusätzliche Informationen befanden sich auf dem Beurteilungsbogen (im Anhang) auf der Vorderseite. Ein Hinweis darauf, dass es bei diesem Versuch kein richtig oder falsch gebe, was durch das subjektive Empfinden auch zutrifft und genauso das der erste Höreindruck meist entscheidend ist, sollte die Angst vor dem Versuch nehmen. Um den zeitlichen Rahmen des Hörversuchs (max. 20-30 min) einzuhalten hatten die Klangbeispiele eine kurze Länge, liefen aber in einer Endlosschleife (Loop) ab. Dadurch konnte das Klangbeispiel so oft gehört werden wie gewünscht. Sofern ein Beispiel bewertet wurde, wurde die Aufnahme gestoppt und nach einer kurzen Regenerierungsphase (ca. 10 sec) das nächste Beispiel abgespielt. Dadurch wurde der Nachteil der möglich auftretenden Verzerrungseffekten¹⁰³ umgangen, damit das Gehör sich nicht vom vorherigen Soundbeispiel beeinflussen lässt. Die Steuerung während des gesamten Versuchs lag beim Versuchsleiter, damit der Proband nicht anfängt die einzelnen Klangbeispiele zu vergleichen, da dies nicht Sinn und Zweck des Versuchs war.

6.3 Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Als gewünschtes Resultat aus den einzelnen Versuchen wurde eine Rangordnung angestrebt um die einzeln getesteten subjektiven Eigenschaften zu ordnen und zu interpretieren. Um diese Ordnung zu erreichen musste jedes Testergebnis in einen festen Zahlenwert gewandelt werden. Dies wurde durch die Bildung eines Mittelwertes erreicht. Dabei wurde aus der relativen Häufigkeit, also der Häufigkeit mit der ein Soundbeispiel mit einem bestimmten Wert bewertet

¹⁰³ Bias Effekt: die Beurteilung eines Soundbeispiels wird eventuell das vorhergehende Soundbeispiel beeinflusst. HEAD Application Note (2005), S. 3

wurde, ein Mittelwert gebildet geteilt durch die Anzahl der Versuchsteilnehmer. Man erhält einen Durchschnittswert mit dem jedes einzelne Klangbeispiel einem zugeordneten subjektiven Adjektiv bewertet wurde und dadurch die gewünschte Staffelung.

Hörversuch 1

Für den ersten Hörversuch, bei dem der praktische Einsatz des Rauschen als Gestaltungsmittel untersucht werden sollte, wurden folgende Attribute gewählt die einer passenden subjektiven Eigenschaft zur gewünschten Beschreibung entsprechen:

Räumlichkeit: Entsteht durch Hinzufügen des Rauschens ein Raumeindruck und wie wird diese rauschüberlagerte Signal im Kontrast zum komplett trockenen und dem Originalloop eingeordnet?

Homogenität: Wird das editierte Schlagzeug durch ein Rauschen vom Klangbild runder, also wächst der Zusammenhalt?

Wärme: Wird der Sound durch Rauschen „wärmer“, d.h. klingt er analoger?

Rangfolge „Räumlichkeit“

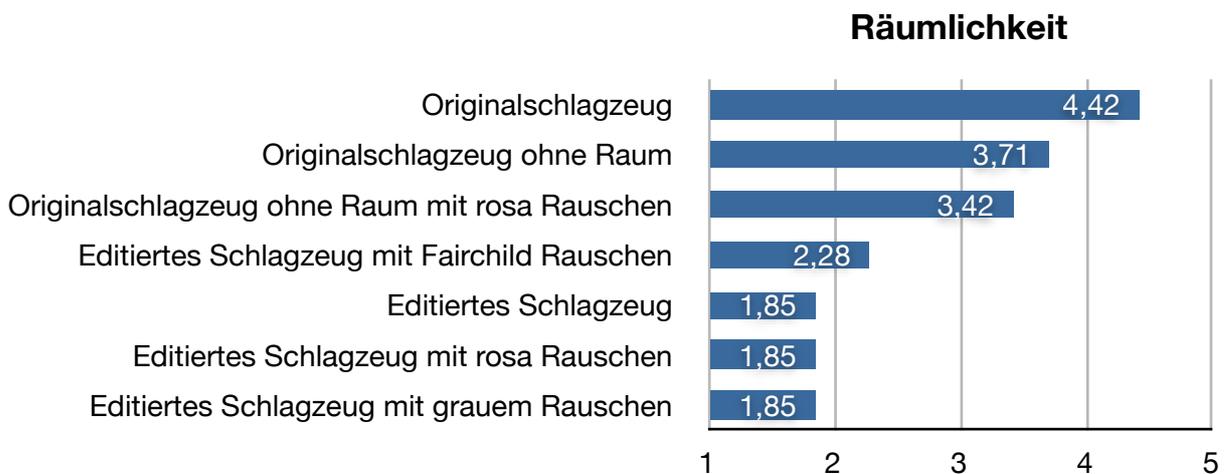


Tabelle 2: Rangfolge „Räumlichkeit“

Die beiden Referenzen in Form des Originalen Schlagzeugloops als räumliches Maximum und dem editierten Schlagzeug, das den Eindruck eines gegateten trockenen Schlagzeug hatte, wurden jeweils richtig erkannt und beurteilt.

Rangfolge „Homogenität“

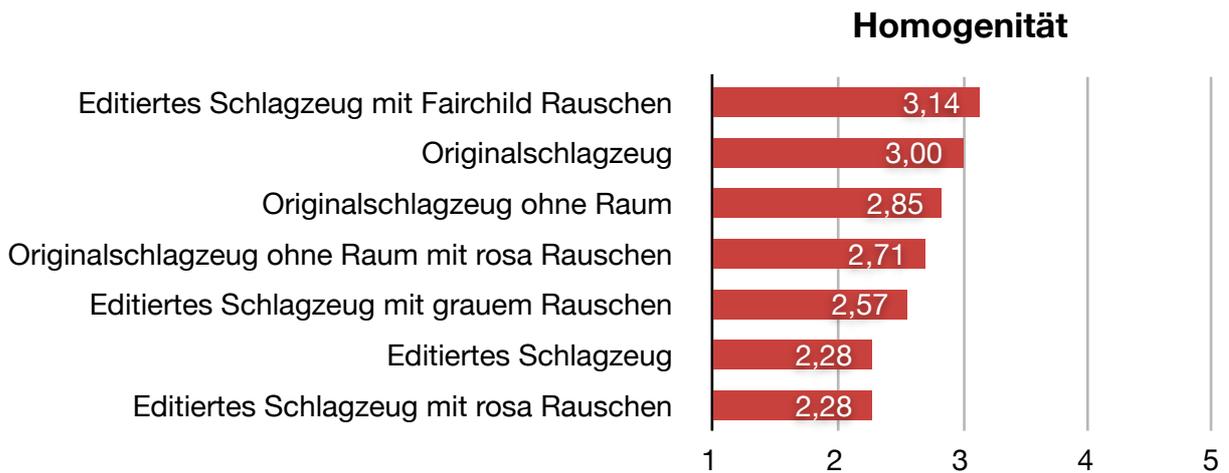


Tabelle 3: Rangfolge „Homogenität“

Eine richtige Referenz wie es bei der Räumlichkeit der Fall ist, gibt es hier nicht da die Homogenität ausschließlich subjektiv ist. Jedoch kann von einem runden einheitlichen Gesamtklang bei dem Originalschlagzeugloop ausgegangen werden. Genauso lassen die Einzelschläge des editierten Schlagzeugs jeden Zusammenhalt vermissen.

Rangfolge „Wärme“

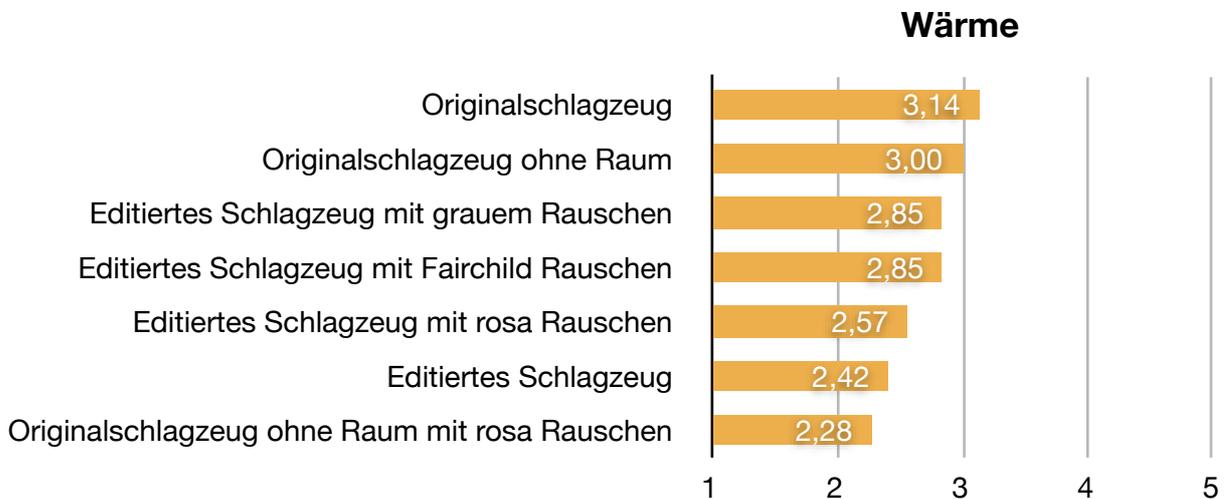


Tabelle 4: Rangfolge „Wärme“

Interpretation der Ergebnisse

Nach Auswertung des ersten Hörversuchs und der Erstellung der Rangfolgen lässt sich vorneweg sagen, dass das Rauschen keine Räumlichkeit vermittelt. Lediglich der editierte Schlagzeugloop der mit dem Rauschen des Fairchild Kompressors unterlegt wurde erzeugt den Eindruck einer gesteigerten Räumlichkeit im Bezug zu dem editierten Schlagzeugloop.

Eigentlich war dies abzusehen, da Raumeffekte eher durch einen Hall erzeugt werden. Aber der hier getestete Ambience Effekt als einen Einsatz des Rauschens als Gestaltungsmittel zielt nicht nur auf den reinen Raum Effekt ab, sondern auch auf die Eigenschaften eines Raumes wodurch immer etwas Übersprechen auf den einzelnen Mikrofonen ist und ein runderer Klang und damit mehr Zusammenhalt des Schlagzeug als Ganzes entsteht. Dieser Aspekt des einheitlichen Zusammenspiels wurde teilweise durch Rauschen erreicht. Besonders die „angenehmeren“ Rauschfarben, wie das graue und das Rauschen des Fairchild Kompressors machen den Gesamtklang runder. Gefahr läuft man hierbei jedoch unter dem Aspekt, dass das Rauschen des Fairchild Kompressors möglicherweise mit, zwar minimalen aber eventuellen wahrnehmbaren, harmonischen Verzerrungen gespickt ist. Denn das graue Rauschen als solches zeugt zwar auch von einem gesteigerten Zusammenhalt der Einzelsamples im Kontrast zum editierten Klangbeispiel, aber diese massive Abgrenzung des Fairchild Rauschens ist schon erstaunlich. Ob das am Rauschen allein liegt wird hoffentlich die Auswertung von Hörversuch 2 zeigen. Prinzipiell lässt sich ein durch Ambience hervorgerufenen Zusammenhalt mit Rauschen erzeugen, jedoch muss darauf geachtet werden, wie bei dem Einsatz von Rauschen bereits definiert, dass das Rauschen sich nicht als störend erachtet. Eine möglich wahrgenommene Räumlichkeit ist hierbei zwar nicht eingetreten, aber könnte dieser Effekt im Gesamtkontext einer Mischung stärker hervortreten, da hier nur das reine Schlagzeug bewertet wurde. Es versteht sich von selbst, dass ein solch künstlich erzeugtes Schlagzeug nie wie eine originale Aufnahme klingen wird. Dennoch lässt sich im Gesamtkontext einer digitalen Mischung etwas Natürlichkeit und Zusammenhalt der Einzelsamples vermitteln, die in einem wohlwollenderen Klangbild als die ursprüngliche Beat-Programmierung aus Einzelsamples resultieren.

Für den Aspekt des Rauschens als Bezug zur Analogtechnik galt es zusätzlich die analoge „Wärme“ einzufangen. Hierbei war klar das der Originalloop als Einheit am „wärmsten“ klingt, da hier der Gesamtklang einer sympathischen Empfindung entspricht. Jedoch und das ist das erstaunliche wird bei dem mit Rauschen unterlegten Klangbeispielen tatsächlich eine wärmere Empfindung vernommen. Wieder ganz vorne rangiert das Rauschen des Fairchild Kompressors, was aber auch mit den Verzerrungen der Bauteile zusammenhängen könnte. Auch das graue Rauschen drängt sich in der Wahrnehmung nicht auf und vermittelt angenehme Affinität zur analogen Welt. Mit Rauschen wird der Klang im Bezug zu einem trockenen Signal also „wärmer“, was zwar vieles bedeuten kann, aber hier für den Effekt des analogen Bezuges steht und ein Rauschen womöglich in einem festen klanglichen Bezug zur analogen Welt steht.

Hörversuch 2

Bei diesem Versuch, der die einzelnen Rauschfarben in Hinsicht auf ihre Empfindung untersuchte, galt es den Klangcharakter zu bewerten. Um festzustellen welche Rauschfarbe am angenehmsten klingt, wurden die einzelnen Loops auf einer Skala von lästig (1) bis angenehm (5) kategorisiert. Referenz ist der Originalloop, jedoch kann selbst ein Klangbeispiel das mit einem Rauschen unterlegt wurde angenehmer als das Original klingen. Die zusätzliche Dynamikkompensation durch Hinzufügen von Rauschen wurde hier anhand der Kategorisierung der Klangbeispiele von schlank (1) bis fett / voluminös (5) eingeordnet. Hierbei erhält man zwei unterschiedliche Ergebnisse. Zum einen eine Aussage darüber ob das Rauschen einen komprimierten Eindruck hinterlässt und mit welches Rauschen, durch seine spektrale Energieverteilung, dies am besten zu erreichen ist.

Rangfolge „Was klingt am angenehmsten?“

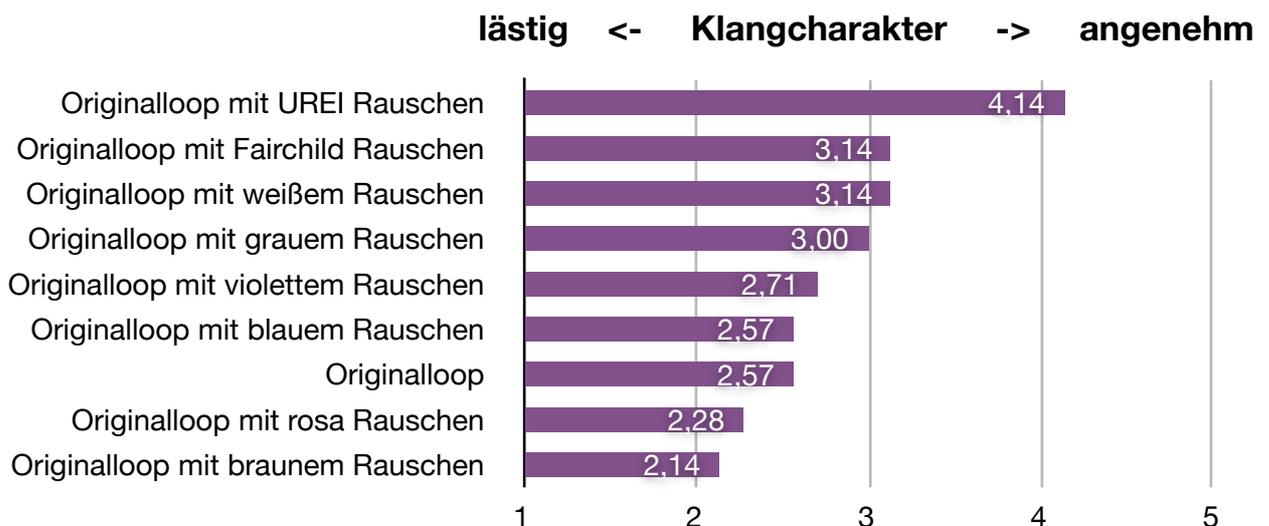


Tabelle 5: Rangfolge „Was klingt am angenehmsten?“

Eine Referenz im Sinne des originalen Songausschnitts ist zwar vorhanden, aber zur Beurteilung nicht relevant. Es lässt sich zwar die Aussage treffen ob ein Klangbeispiele, das mit Rauschen unterlegt wurden besser oder schlechter als das Original klingt, dennoch ist diese Empfindung vollkommen subjektiv. Der originale Song gefällt dem einen von Anfang an, während er für den anderen lästig klingt.

Rangfolge „Was klingt am druckvollsten?“

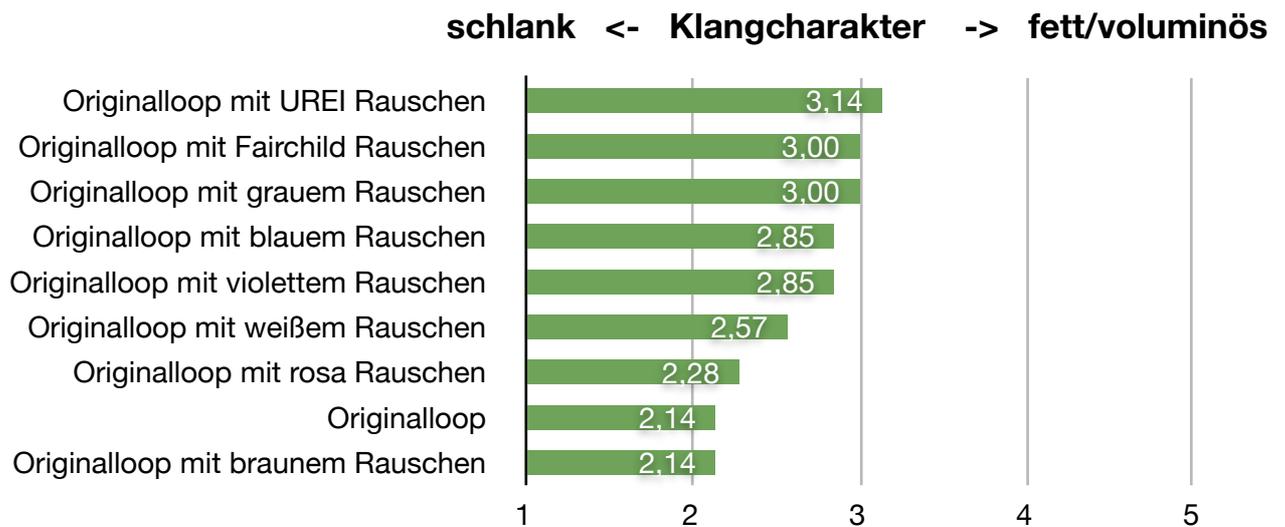


Tabelle 6: Rangfolge „Was klingt am druckvollsten?“

Interpretation der Ergebnisse

Die gewisse Erwartungshaltung an den angenehmen Klangcharakter, er auf der theoretischen Definition anhand des Spektrums basierte, wurde nicht ganz getroffen. Die dunklen Rauschfarben des rosa und braunen Rauschens wurden im Kontrast zu den anderen Rauschfarben als am lästigsten angesehen. Via Charakterisierung müssten sie aber als angenehmste klingen. Ursache wird hier die starke Relation zur Musik sein. In der reinen Wahrnehmung von Rauschen, als alleiniges Signal, werden die getroffenen Aussagen über die Empfindungen zutreffen, aber im Kontext mit der Musik ist es stark abhängig wie es sich in die Mischung einfügt und zum Klangeindruck passt. Vermittelte Melancholie durch rosa Rauschen, wie bereits beschrieben, kann in der Musik seinen Effekt bewirken, jedoch ist dies von dem Gesamtmix des Songs und den repräsentativen Frequenzen abhängig. Bei den getesteten Songbeispiel war die Mischung schon ziemlich basslastig. Tiefe Frequenzen die sowieso schon vorhanden sind kommen zusätzlich durch die dunkle Rauschfarbe hinzu und addieren sich zum Gesamtsignal. Dies führte durch Überlagerung mit einem rosa oder braunem Rauschen in der Wahrnehmung zu einer Verdeckung und Verwischung im Bassbereich. Zwar ist dies nicht stark wahrnehmbar äußerte sich aber nichts desto trotz in einer unangenehmeren subjektiven Empfindung.

Das weiße Rauschen hingegen, definiert als Störung, erzeugte hier die gegensätzliche Erwartung. Überraschenderweise machte es sich nicht als Störung bemerkbar, sondern verhalf der Mischung des Klangbeispiels zu einem offeneren Charakter. Zusätzliche Kommentare wie „etwas aggressiver“, „etwas offener“ oder „Höhen klingen weicher“ beschrieben den bereits

kennen gelerntem Effekt, wie er z.B. bei dem Rauschen durch den Gitarrenverstärker erzielt werden kann. Hierbei zeigt sich auch wieder die Affinität zur Mischung des Songs. Deswegen sind auch das blaue und violette Rauschen durch ihre Höhenpräsenz weiter vorne platziert, da diese auch bei nicht zu viel Pegel die Aufgabe eines Exciters zugeschrieben kommen.

Dieser Hörversuch lieferte auch die Kenntnis, dass an dem Rauschsignal analoger Kompressoren wirklich mehr daran sein muss als das reine Rauschen. Harmonische Verzerrungen überlagern sich womöglich mit dem Grundrauschpegel der Geräte, was aber auch darauf schließen lässt dass das Rauschen in diesen Fällen vollkommen akzeptiert ist. Die Wahrnehmung stört sich nicht daran und empfindet es sogar um ein vielfaches angenehmer als das Original Beispiel. Auch die dem Gehör angepasste angenehme Rauschform des grauen Rauschens zeigt sich wieder deutlich angenehmer als die anderen Rauschfarben. Folglich bildet das graue Rauschen ein gut einzusetzendes Stilmittel in der Klanggestaltung.

Die Erkenntnis dass die primäre Beschreibung der Wahrnehmung anhand des Spektrums bei reinen Rauschsignalen zutrifft ist klar und wurde auch teilweise durch den Versuch erreicht (graues Rauschen, rosa Rauschen der Kompressoren). Jedoch kann dies alles abweichen je nachdem wie es zur Stimmung des Songs beiträgt. Das trifft auf genau die Eigenschaften zu die für eine angenehme Klanggestaltung definiert wurden. Wird eine Absicht hinter dem Rauschen deutlich (Klangfarbe als Stimmungsträger) mit der eine gewisse Verbindung einhergeht (Form mit bekannten Bezug), kann selbst das störendste Rauschen plötzlich angenehm zum Klangeindruck beitragen. Die Klangfarbe des Rauschens äußert sich in einer deutlichen Absicht. Selbst das weiße nervige Rauschen hat daher seine Berechtigung und kann gezielt zu einer Klanggestaltung beitragen.

Der zusätzliche Effekt der Dynamikkompression, der sich durch das Rauschen einstellt wurde hier sozusagen „nebenbei“ getestet. Jedes Klangbeispiel wurde besser, bis auf eins genauso, bewertet wie der Originalloop. Folglich trifft der Effekt der empfundenen Kompression für alle Rauscharten zu. Dass die Grundrauschen der analogen Geräte wieder vorne mit dabei sind überrascht nicht, denn theoretisch könnte so das tatsächlich komprimierte Signal aus dem Ausgang des Kompressors klingen. Wer also ein Sample oder Instrument in der Mischung fetter und wärmer klingen lassen will kann getrost auf ein Rauschen zurückgreifen. Jedoch muss bei der Wahl auf die bereits in Kapitel 5.1 definierte Form geachtet werden, damit es zu keinen Verwischungen kommt.

7. Schlusswort

Nach Ende dieser Arbeit wurde das Wort Rauschen allein über 650 mal geschrieben. Trotzdem steht diese Zahl in keiner Relation zu dem Eigentlichen Spektrum den das Rauschen erfasst. Als all umfassendes ist es theoretisch Träger aller Information, auch der Musik. Jedoch ist Rauschen und Musik für uns nicht gleichbedeutend. Chaos steht der Ordnung gegenüber und daher der Zufall der Periodizität. Es zeigte sich, dass die Periodizität, als entscheidendes Merkmal einer angenehmen Empfindung, einen genauen Tonhöhereindruck und dadurch einen festen Bezug zulässt. Die Tonhöhe ist es, die bekannte Bezüge herstellt und im Falle der Musik verantwortlich für einen angenehmen Klang ist. Im Chaos hingegen gibt es keinen festen Bezug, theoretisch ist alles Bezugspunkt, weshalb ein gestörter Eindruck resultiert. Diese zwei Extreme unterscheiden das Rauschen von einer empfundenen Störung, in Form des Lärms als reizüberflutendes Geräusch und von dem bekannten Phänomen mit einer Zuordnung in Form der Tonhöhe und daher einem tonalen Charakter.

Bei der Untersuchung der unterschiedlichen Empfindungen natürlicher Rauschphänomene stieß man wieder auf die Gegenüberstellung von Chaos und Ordnung, Zufall und Vorhersehbarkeit. Im Analogie des Verkehrsrauschen zum Meeresrauschen ist dies der dynamische zum statischen Prozess. Wie man es auch nennen mag, Dynamik, Chaos oder Zufall all dies führt dazu, dass das Gehör ständig versucht bekannte Empfindungen mit den heraustretenden Geräuschen des Chaos herzustellen. Diese Unbekannten Faktoren verhindern, dass sich eine Periodizität und Ordnung einstellt und sind bei der genauen Betrachtung das Merkmal einer empfundenen inneren Unruhe und der Unterschied zum angenehmen Meeresrauschen. Beim Rauschen des Meeres oder des Windes hört sich alles gleich an und gibt es so gut wie keine Geräusche die herausstechen und daher unbekannt wirken. Es findet zwar auch eine Reizüberflutung statt, aber diese schlägt sich durch die Konstanz in einer Monotonie nieder. Eine gefühlte Wiederholung und ein fester Klangeindruck stellt sich ein und das Gehör flüchtet sich in die Entspannung. Daraus resultiert die Erkenntnis, dass Ordnung, Wiederholung und Monotonie als Faktoren für eine ermöglichte Entspannung und einer angenehmen Empfindung dienen.

Beim Einsatz solcher natürlicher Rauschphänomene anhand ihrer äquivalenten Rauschfarbe in der Praxis zeigte sich deutlich, dass ohne Intention sich kein angenehmer Klangcharakter einstellen kann. Entgegen der Erwartungshaltung nach den spektralen Definitionen der Rauschfarben lieferten die Hörversuche die Erkenntnis, dass die Wahrnehmung von Rauschen in der Musik sich von der allgemeinen Wahrnehmung von Rauschen unterscheiden kann. Das krächzende Klangbild von weißem Rauschen kann sich in einer angenehm empfundenen Präsenz

widerspiegeln, während ruhiges braunes Rauschen in einer Verwischung des Bassbereichs resultiert und daher eher den Sound einer schlechten MP3 File erhält. Je nach Ausgewogenheit der musikalischen Mischung ist dies abhängig und resultiert in unterschiedlichen Empfindungen. Dieses Resultat bestätigte nur die drei definierten Voraussetzungen, die einen positiven Einsatz des Rauschens als Stimmungsträger oder Gestaltungsmittel zulassen. Der Form des Rauschens die sich in einer natürlichen Abbildung widerspiegelt, der Klangfarbe durch die ein Bezug zu etwas bekanntem und einer Ordnung assoziiert wird und die Amplitude des Rauschens damit die Schwelle des subjektiv Unangenehmen nicht überschritten wird. Werden nämlich die empfindlichen Bereiche der menschlichen akustischen Wahrnehmung nicht besonders stark angesprochen (= Amplitude) und wird die Intention des Einsatzes von Rauschen deutlich (= Form), dient das Rauschen als Stimmungsträger und äußert sich auch in einem gesteigerten angenehmen Klangcharakter (= Klangfarbe) mit bekannter Verbundenheit.

Trotz alledem ist das Rauschen in der Musik immer noch nicht angekommen und wird es wahrscheinlich auch nie. Als unbekannter Faktor in der Musik gehört es nicht zum gewohnten Klang. Die Hörversuche brachten aber auch die Erkenntnis das nicht alles am Rauschen negativ ist. Besonders die Affinität der sehr begehrten analogen Studioteknik machte sich durch den Einsatz des Grundrauschens des UREI 1176 und dem Fairchild Kompressor deutlich. In allen verwendeten Hörtest rangierten diese beiden in den oberen Rängen und wurden teilweise angenehmer und voluminöser als der originale Referenzloop empfunden. Also kann am Rauschen nicht alles schlecht sein. Experimentieren heißt hier die Devise denn dadurch lassen sich viele neue Sounds und Stimmungen erzeugen. Wie schon in der ganzen Audiotechnik ist alles erlaubt ist was gefällt. Der Kreativität sind keine Grenzen gesetzt.

Für mich persönlich war das Rauschen schon immer mehr als nur Störung. Aber das wirkliche Potenzial das darin steckt wurde mir erst durch die genaue Befassung mit dem Thema im Rahmen dieser Arbeit verdeutlicht. Es war auch sehr interessant neben der technischen und mathematischen Betrachtung in die genaueren Bereiche der Wahrnehmung, Psychologie und teilweise sogar in die Neurologie vorzustößen, um das Rauschen näher definieren zu können. Dies war aber auch alles notwendig um einen präzisen Überblick über das Rauschen zu schaffen. Das aber mit dieser Thematik, was den Einsatz als Gestaltungsmittel und der Wahrnehmung von Rauschen angeht, so gut wie keine Literatur vorhanden ist, machte den besonderen Reiz dieser Arbeit und eine richtige Herausforderung für mich aus. Deswegen hoffe ich das durch eine logische Herangehensweise und Auseinandersetzung mit der Thematik ein objektiver Überblick gegeben wurde und vielleicht zur weiteren Forschung und natürlich zur kreativen Klanggestaltung anregt.

VI. Begleitende Audio-CD

Titel Nr.	Beschreibung
1	Hörversuch 1 Loop 1
2	Hörversuch 1 Loop 2
3	Hörversuch 1 Loop 3
4	Hörversuch 1 Loop 4
5	Hörversuch 1 Loop 5
6	Hörversuch 1 Loop 6
7	Hörversuch 1 Loop 7
8	Hörversuch 2 Loop 1
9	Hörversuch 2 Loop 2
10	Hörversuch 2 Loop 3
11	Hörversuch 2 Loop 4
12	Hörversuch 2 Loop 5
13	Hörversuch 2 Loop 6
14	Hörversuch 2 Loop 7
15	Hörversuch 2 Loop 8
16	Hörversuch 2 Loop 9
17	Weißes Rauschen des Hörversuchs
18	Rosa Rauschen des Hörversuchs
19	Braunes Rauschen des Hörversuchs
20	Blaues Rauschen des Hörversuchs
21	Violettes Rauschen des Hörversuchs
22	Graues Rauschen des Hörversuchs
23	Grundrauschen des UREI 1176 Kompressors
24	Grundrauschen des Fairchild Kompressors
25	Robinson Cruise Flow - „Ohne Uns“ Roughmix

VII. Quellenverzeichnis

Literatur

- Baumann, Max Peter: *Rauschen im Kopf*, In: Sanio/Scheib 1995, S. 27 - 40
- Brechmann et al.: *Elektrotechnik - Tabellen Kommunikationselektronik* (3. Auflage), 2002 Westermann Schulbuchverlag GmbH, Braunschweig
- Clarke, John / Voss, Richard F.: *1/f-Rauschen in der Musik: Musik aus 1/f-Rauschen*, In: Sanio/Scheib 1995, S. 113 - 125
- Ellermeier, Wolfgang / Hellbrück, Jürgen: Hören - Psychakustik - Audiologie, In: *Handbuch der Audiotechnik*, 2008. Hrsg. v. Stefan Weinzierl, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, S. 42 - 86
- Ebner, Michael: *Elektronik für Veranstaltungstechnik*, 2004 Elektor-Verlag GmbH, Aachen
- Friesecke, Andreas: *Die Audio-Enzyklopädie: ein Nachschlagewerk für Tontechniker*, 2007 K. G. Saur Verlag, München
- Görne, Thomas: *Tontechnik*, 2008 Carl Hanser Verlag, München, Wien
- Fink, Gereon R. / Krumbholz: Funktionelle Organisation des auditorischen Systems, In: *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*, 2007, Hrsg. v. Gereon R. Fink / Frank Schneider, Springer Medizin Verlag, Heidelberg, S. 256 - 263
- Heidenreich, Stefan: *Rauschen, filtern, codieren - Stilbildung in Mediensystemen*, In: Sanio/Scheib 1995, S. 17 - 26
- Höldrich, Robert R.: *Auf der Suche nach dem Rauschen*, In: Sanio/Scheib 1995, S. 126 - 146
- Meyer, Martin: *Signalverarbeitung - Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter* (4. Auflage.), 2006 Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden
- Müller, Rudolf: *Halbleiter-Elektronik Band 15: Rauschen* (2. Auflage), 1990 Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Palotas, László: *Elektronik für Ingenieure: Analoge und digitale integrierte Schaltungen*, 2003 Vieweg Verlag, Wiesbaden
- Papula, Lothar: *Mathematische Formelsammlung* (9. Auflage), 2006 Vieweg Verlag, Wiesbaden
- Raffaseder, Hannes: *Audiodesign*, 2002 Carl Hanser Verlag, München, Wien
- Sanio, Sabine / Scheib, Christian: *Das Rauschen: Aufsätze zu einem Themenschwerpunkt im Rahmen des Festivals „musikprotokoll '95 im steirischen herbst“*, 1995, Wolke Verlag Hofheim
- Sanio, Sabine: *Das Rauschen: Paradoxien eines hintergründigen Phänomens*, In: Sanio/Scheib 1995, S. 50 - 66
- Sanio Sabine: Rauschen - Klangtotal und Repertoire. Zur Selbstreflexivität der ästhetischen Erfahrung, In: *Rauschen - Seine Phänomenologie und Semantik zwischen Sinn und Störung*,

2001, Hrsg. v. Andreas Hiepko / Katja Stopka, Verlag Königshausen & Neumann GmbH, Würzburg, S. 207 - 224

Scheib, Christian: *Die indiskrete Arbeit am Realen. Das Rauschen ist die Musik*, In: Sanio/Scheib 1995, S. 67 - 79

Skritek, Paul: *Handbuch der Audio-Schaltungstechnik*, 1988 Franzis-Verlag GmbH, München

Weibel, Peter: *Geräusche, Rauschen, Schall und Klang*, In: Sanio/Scheib 1995, S. 81 - 96

Internetquellen¹⁰⁴

Caspari, Christoph: *Technik - Wie funktioniert was?*, 2010 <http://www.elektronikinfo.de/technik.htm>

Sondergeld, Nora: *Feldeffekttransistoren*, <http://www.elektropla.net/grundlagen65.html>

<http://www.elektro.de/lexikon.html>

<http://www.itwissen.info>

<http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037>

http://www.one-electron.com/FC_ProAudio.html

<http://warp.net/>

Sonstige Quellen

Berberich, Katharina / Kay, Art: *Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen* Teil 1, 24. August 2007, ElektronikPraxis Nr. 16, S. 52 - 54

Berberich, Katharina / Kay, Art: *Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen* Teil 2, 21. September 2007, ElektronikPraxis Nr. 18, S. 33 - 36

Bieger, Hannes: *Rauschen*, Mai 2008, Sound & Recording 05.2008, S. 100 - 102

Bieger, Hannes: *Klanggestaltung mit Rauschsignalen*, Juni 2008, Sound & Recording 06.2008, S. 100 - 102

HEAD Application Note: *Durchführung von Hörversuchen*, 2005/2006

HAMEG Instruments Fachartikel: *Was ist Rauschen?*, 2009

Helwig, Katharina: *Das Rauschen in der Kunst*, November 2008, Kunstmagazin 0811, S. 8 - 11

Koch, Andreas: *Versuch: Operationsverstärker*, Versuchsunterlagen zum Praktikum Elektronik 1, 2009 Hochschule der Medien Stuttgart

¹⁰⁴ Für die Internetquellen gilt der Stand vom 12.03.2010

VIII. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau einer Röhrentriode http://www.elektronikinfo.de/techpic/strom/roehrentriode.gif	06
Abb. 2: Aufbau und Elektronenfluss eines NPN-Transistors Grafik Tobias Neumann.....	08
Abb. 3: Aufbau des Feldeffekttransistors Grafik Tobias Neumann.....	09
Abb. 4: Entstehung des elektrischen Feldes (hellgrau) eines Feldeffekttransistors Grafik Tobias Neumann.....	10
Abb. 5: Innerer Aufbau des Operationsverstärkers Datasheet LM741	11
Abb. 6: Invertierender Verstärker Grafik Tobias Neumann.....	12
Abb. 7: Gaußverteilung des stochastischen Rauschsignals Berberich / Art, Teil 1, S. 53	15
Abb. 8: Spektrum des Rauschens im Frequenzbereich Müller, S. 42	18
Abb. 9: 1/f-Rauschen bei zeitlicher und statistischer Betrachtung Berberich / Kay, Teil 2, S. 34	21
Abb. 10: Ersatzschaltbild eines rauschenden Widerstands Skritek, S. 57	23
Abb. 11: Ersatzschaltbild eines rauschenden bipolaren Transistors Skritek, S. 59.....	24
Abb. 12: Rauscheffekte bei Feldeffekttransistoren Müller, S. 161	25
Abb. 13: Ersatzschaltbild eines rauschenden Operationsverstärkers Skritek, S. 61	26
Abb. 14: Spektrale Dichte eines rauschenden OPs Berberich / Kay, Teil 2, S. 34	27
Abb. 15: Rauschspektrum des SSM2019 Datasheet Audio Preampfier SSM2019	27
Abb. 16: Differenzielle Aktivierung durch die Wahrnehmung von Rauschen Fink / Krumbholz, S. 260	36
Abb. 17: Energiespektrum des weißen Rauschens Screenshot Tobias Neumann	40

Abb. 18: Kurven gleicher Lautstärken Ellermeier / Hellbrück, S. 54.....	41
Abb. 19: Energiespektrum des rosa Rauschen Screenshot Tobias Neumann	42
Abb. 20: Energiespektrum des braunen Rauschens Screenshot Tobias Neumann	43
Abb. 21: Energiespektrum des blauen Rauschens Screenshot Tobias Neumann	44
Abb. 22: Energiespektrum des violetten Rauschens Screenshot Tobias Neumann	45
Abb. 23: Energiespektrum des grauen Rauschens Screenshot Tobias Neumann	45
Abb. 24: Energiespektrum des Rauschen des Fairchild Kompressors Screenshot Tobias Neumann	46

IX. Anhang

1. Formular zum Hörversuch Seite 1:

Hörversuch - Bachelorarbeit - Tobias Neumann

Klangliche Unterschiede analoger Schaltungen in Abhängigkeit derer Bauteile

Der vorliegende Hörversuch soll klären, inwiefern die verbauten Bauteile und deren Schaltungsart sich auf den Klang auswirken. Erreicht wurde dies durch den Einsatz verschiedener Effektgeräte in den jeweiligen Schaltungsarten.

Da keine Unterschiede zwischen den einzeln bearbeiteten Soundbeispielen, sondern die erste subjektive Wahrnehmung entscheidend ist, sollen die einzelnen Klangbeispiele nicht miteinander verglichen werden, sondern einzeln durchgehört und bewertet werden.

Die Beurteilung erfolgt auf einer Skala von 1 bis 5, wobei 5 immer das Extrem bedeutet, z.B. 5 bei Räumlichkeit = am räumlichsten, 1 bei Räumlichkeit = nicht räumlich usw. Zudem haben Sie die Möglichkeit eigene Eindrücke und Anmerkungen zu notieren die Ihre Beurteilung unterstreicht.

Während dem Hörversuch werde ich die ganze Zeit für Fragen zur Verfügung stehen und denken Sie daran, der erste Höreindruck ist meistens entscheidend.

Schon mal vorab vielen Dank fürs Mitmachen!

1. Formular zum Hörversuch Seite 2:

Hörversuch 1:

Sie hören einen Schlagzeugloop der unterschiedlich bearbeitet wurde. Die Quantisierung spielt hierbei keine Rolle.

Wie beurteilen sie die.....

	Räumlichkeit?					Homogenität?					Wärme?					Kommentar
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Loop 1																
Loop 2																
Loop 3																
Loop 4																
Loop 5																
Loop 6																
Loop 7																

Hörversuch 2:

Sie hören ein kurzen Ausschnitt eines Songs dessen Summe unterschiedlich bearbeitet wurde. Die Mischung der einzelnen Spuren zueinander kann vernachlässigt werden.

Wie beurteilen Sie den.....

	Klangcharakter?										Kommentar	
	lästig <--> angenehm					schlank <--> fett / voluminös						
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Loop 1												
Loop 2												
Loop 3												
Loop 4												
Loop 5												
Loop 6												
Loop 7												
Loop 8												
Loop 9												

