

Psychoakustik & Psychoakustik-Effekte

Ziel dieser Ausarbeitung ist es, das bereits aus den Vorlesungen bekannte Wissen mit neuem zu ergänzen und einen praktischen Einblick in die Anwendung psychoakustischer Erkenntnisse anhand psychoakustischer Effekte zu gewähren.

Inhaltsverzeichnis

Psychoakustik & Psychoakustik-Effekte	1
1. Psychoakustik & Schallwahrnehmung.....	3
Empfindungsgrößen	3
Lautstärkepegel [phon]	4
Lautheit [sone]	4
Tonheit [mel]	5
Rauhigkeit [asper].....	6
Schwankungsstärke [vacil]	6
Schärfe [acum].....	6
Impulshaltigkeit.....	6
Tonhaltigkeit.....	7
Residualton.....	7
und mehr... ..	7
Anwendung	7
2. Psychoakustik-Effekte	8
Exciter	8
Bass Enhancer.....	9
Stereo Enhancer	9
Enhancer, Maximizer, Vitalizer,	10
Transientendesigner.....	10
3. Fazit	12
4. Quellen	13

1. Psychoakustik & Schallwahrnehmung

Die Psychoakustik untersucht den Zusammenhang zwischen den **physikalischen Schallfeldgrößen** (Schalldruckpegel, Frequenz, Schalldauer, ...) und der **subjektiven Schallempfindung** des Menschen. Die in Abbildung 1 gezeigte menschliche Hörfläche sollte jedem ein Begriff sein. Sie wird allseitig

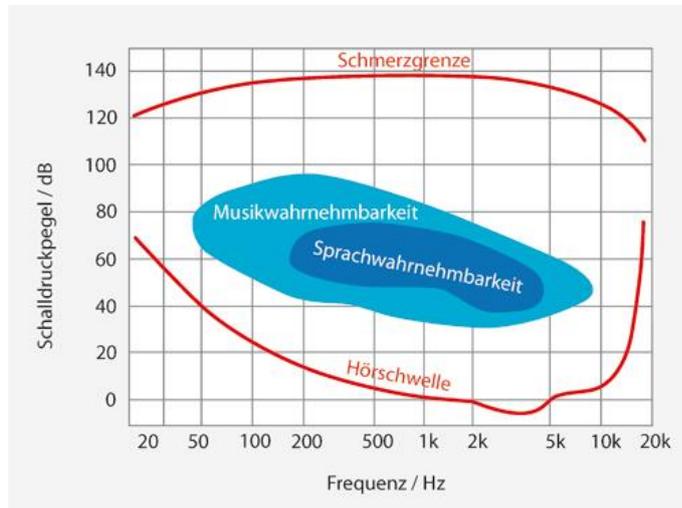


Abbildung 1: menschliche Hörfläche

eingegrenzt. Von unten über die Hörschwelle, also dem leisesten Schalldruckpegel bei dem wir den Schall überhaupt erst wahrnehmen in Bezug zur jeweiligen Frequenz. Die Schmerzgrenze stellt analog die Obergrenze dar. Links und rechts stehen die tiefste und höchste wahrnehmbare Frequenz des menschlichen Gehörs. Schon bei dieser grundlegenden Betrachtung der Schallwahrnehmung fällt die Nichtlinearität des Gehörs auf, zumal diese Hörfläche bei jedem Menschen anders aussieht und sie sich beispielsweise auch altersbedingt verändern kann.

Empfindungsgrößen

Um die menschliche Schallwahrnehmung also genauer beschreiben zu können und diese Nichtlinearitäten zu untersuchen, wurden die sogenannten **Empfindungsgrößen** mit ihren (Pseudo-) Einheiten eingeführt.

Physikalische Reize wie der Schalldruckpegel, die Frequenz, die Bandbreite und die Schalldauer werden über das Ohr und unsere kognitive Signalverarbeitung wahrgenommen und erzeugen im Gehirn eine bestimmte Empfindung. Unter diese Empfindungsgrößen fallen:

- **Lautstärkepegel** [phon]
- **Lautheit** [sone]
- **Tonheit** [mel]
- **Rauhigkeit** [asper]
- **Schwankungsstärke** [vacil]
- **Schärfe** [acum]

Um mit Empfindungsgrößen arbeiten zu können, müssen diese vorerst definiert werden:

- Empfindungsgrößen sind **Komponenten** der Schallempfindung, die **getrennt voneinander** beurteilt werden können.
- Jede Empfindungsgröße kann durch eine **Kurve** in Abhängigkeit von jeweils **einer Reizgröße** beschrieben werden.
- Die **unberücksichtigten Reizgrößen** bleiben dabei **konstant**.
- Die Kurven entstanden durch **statistische Auswertung** von spezifischen **Hörversuchen**.

Lautstärkepegel [phon]

Bereits anhand der Hörfläche ist die Nichtlinearität des Gehörs in Bezug auf Schalldruckpegel und verschiedene Frequenzen erkennbar. Man nimmt unterschiedliche Frequenzen unterschiedlich laut wahr. Der **Lautstärkepegel** beschreibt die **empfundene Lautstärke in Abhängigkeit der Frequenz und des Schalldruckpegels**.

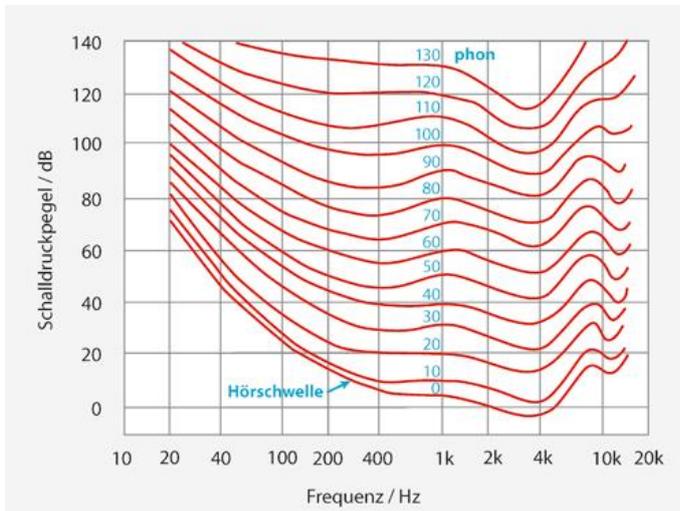


Abbildung 2: Kurven gleicher Lautstärkepegel

Abbildung 2 stellt diesen Zusammenhang mit den ‚Kurven gleicher Lautstärkepegel‘ dar.

Bezugspunkt des Lautstärkepegels mit der **Einheit phon** ist der **Schalldruckpegel in dB bei 1 kHz**.

Hat man beispielsweise einen Sinuston bei 100 Hz mit 60 dB, so verfolgt man die Kurve durch diesen Schnittpunkt, bis sie die 1 kHz Achse schneidet. Da dort dB und phon gleichgesetzt sind, lässt sich somit ein Lautstärkepegel von 50 dB ableiten.

In der Praxis finden diese Kurven u.a. bei der **Geräuschbeurteilung für Normen und Gesetze** Verwendung (A-, B- und C-bewertete Pegel).

Der Nachteil am Lautstärkepegel: Eine Verdopplung des Lautstärkepegels bewirkt keine Verdopplung der empfundenen Lautstärke.

Lautheit [sone]

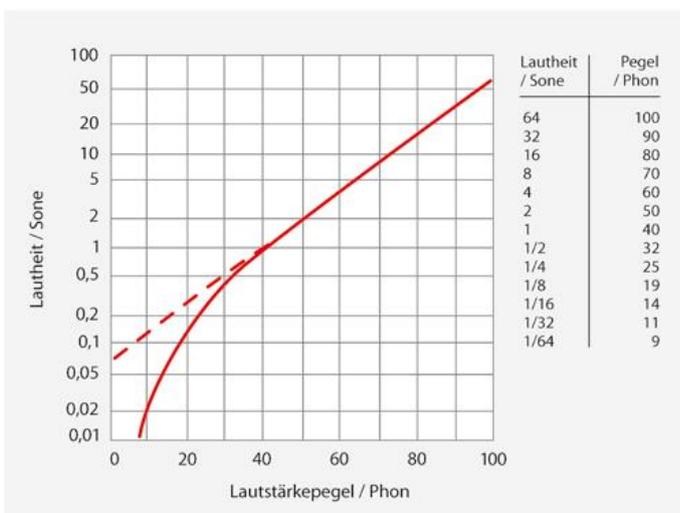


Abbildung 3: Lautheit

Um dies gewährleisten zu können wurde die **Lautheit** mit der **Einheit sone** eingeführt.

1 sone = 40 phon = 40 dB bei 1 kHz

Ab 40 phon geht man davon aus, dass eine Zunahme von 10 phon doppelt so laut empfunden wird. Somit verdoppelt sich auch die Lautheit pro 10 dB Zunahme. Unter 40 phon bewirken schon kleinere Lautstärkepegelschritte eine empfundene Lautstärkeverdopplung (siehe Abbildung 3).

Tonheit [mel]

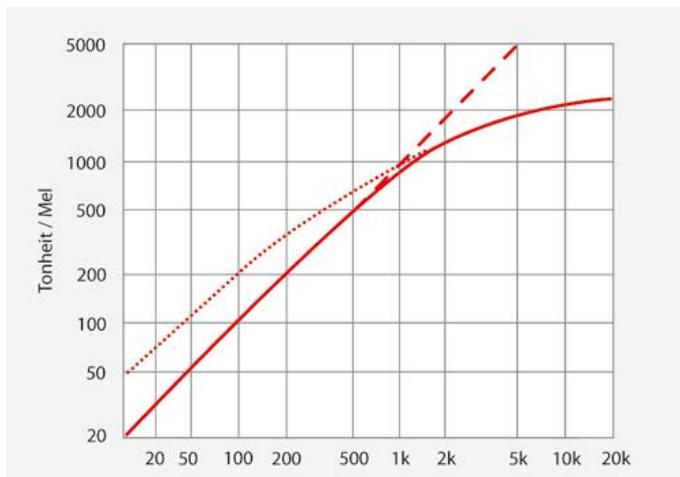


Abbildung 4: Tonheit (gestrichelt: Zeitstruktur, gepunktet: Position der Erregungsmaxima auf Basilarmembran)

Die **Tonheit** mit der **Einheit mel** (vom englischen ‚Melody‘) beschreibt die **wahrgenommene Tonhöhe**. In Abbildung 4 wird sie in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt, kann aber auch bei verschiedenen Schalldrücken und –dauern variieren. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Bezugspunkte eingeführt, heute hat sich allerdings eine Frequenz von 125 Hz durchgesetzt.

125 mel entsprechen demnach 125 Hz.

Wie bei der Lautheit bedeutet auch hier eine **Verdopplung der Tonheit**, dass der Ton **doppelt so hoch** empfunden wird.

Frequenz und Tonheit verlaufen bis etwa 500 Hz linear. D.h. eine Oktave entspricht einer Tonheitsverdopplung. Über 500 Hz laufen die Größen auseinander.

Geht man von 1500 Hz aus und möchte die doppelt so hoch empfundene Frequenz bestimmen, liest man die Tonheit bei dieser Frequenz ab (1100 mel). Die doppelte Tonheit (2200 mel) schneidet die Kurve bei ca. 10 kHz. In diesem Fall bedeutet eine Verdopplung der Tonheit also einen Sprung von 2,5 Oktaven.

Wie kommt diese Nichtlinearität zustande?

Gründe finden sich in der Art der menschlichen Tonhöhenauswertung. **Unter 800 Hz** wird die **Zeitstruktur** des Schallereignisses ausgewertet. Da dies hin zu höheren Frequenzen immer schwieriger wird, wird **über 1600 Hz** die **Position der Erregungsmaxima auf der Basilarmembran** des Innenohrs als Tonhöhenindikator verwendet. An ihrer Basis werden hohe Frequenzen aufgenommen, an ihrem Ende konstruktionsbedingt tiefe Frequenzen. Zwischen dem Ort der maximalen Schwingungsamplitude der Basilarmembran und der Tonheit wird ein linearer Zusammenhang angenommen. Vereinfacht bedeutet dies, dass gleiche Strecken auf der Basilarmembran gleichen Tonheitsdifferenzen entsprechen. **Zwischen 800 und 1600 Hz** findet die Auswertung über **beide Methoden** statt.

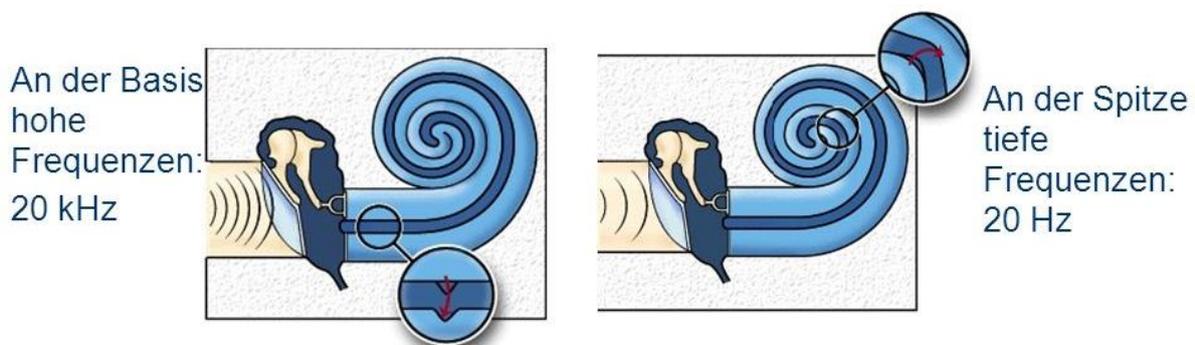


Abbildung 5: Basilarmembran

Rauhigkeit [asper]

Auch hier lohnt sich wieder ein Blick auf das menschliche Ohr. Das **Gehör** kann durch **Bandpassfilter** modelliert werden. Die Bark-Skala teilt dabei in **24 verschiedene Frequenzgruppen** auf. Diese entsprechen 24 gleichlangen Abschnitten auf der Basilarmembran. Sind zwei Töne in unterschiedlichen Bändern, können diese klar voneinander unterschieden werden. Sie werden als zwei unterschiedliche Töne wahrgenommen. Unterschreitet aber die Differenz zweier Töne die **‚kritische Bandbreite‘ (zwischen 15 und 200/300 Hz)**, sind diese Töne im **gleichen Band**. Der Mensch nimmt somit den **dominanteren wahr** und empfindet den **anderen als Rauhigkeit** des ersten.

Die **Rauhigkeit** wird über die **Einheit asper** definiert.

1 asper = 1 kHz-Sinuston mit 70 Hz moduliert mit 60 dB SPL

Das entspricht zwei Sinustönen bei 1000 Hz und 1070 Hz.

Schwankungsstärke [vacil]

Liegen die Frequenzen sehr dicht beieinander (**Differenz < 15 Hz**), kann dieses Phänomen als fortlaufende Phasenverschiebung betrachtet werden. Es entsteht eine kontinuierliche Anhebung und Auslöschung des Signals, die wie ein Tremolo-Effektgerät für Gitarren klingt. Dies wird in der Psychoakustik als **Schwebung** bezeichnet.

Die **Schwankungsstärke** wird über die **Einheit vacil** definiert.

1 vacil = 1 kHz-Sinuston, der zu 100% mit 4 Hz Amplitudenmoduliert wird

Schärfe [acum]

Die **Schärfe** wird über die **Einheit acum** definiert.

1 acum = Rauschen mit Bandbreite von 160 Hz um 1 kHz bei 60 dB SPL

Sie unterliegt der **Verhältnisskalierung**. D.h. Töne und Klänge, die von Versuchspersonen halb so scharf empfunden werden, sind 0,5 acum scharf.

Generell wird diese Methode häufig bei psychoakustischen Tests angewendet, da es für Versuchspersonen recht einfach ist, ihre Empfindungen als doppelt oder halb so laut/hoch/scharf/... einzuordnen.

Impulshaltigkeit

Liegen in einem Signal **schnelle Pegeländerungen** vor, erhöht dies die mögliche Störwirkung.

Bei der Bildung eines Beurteilungspegels muss somit der **Impulshaltigkeitszuschlag** berücksichtigt werden (Lärmbelästigung am Arbeitsplatz durch z.B. Stanze oder Hammer).

Eine Schlagzeugaufnahme weist i.d.R. eine hohe Impulshaltigkeit auf.

Tonhaltigkeit

Sind innerhalb eines Geräuschs **Einzeltöne** herauszuhören, erhöht auch dies die mögliche Störwirkung.

Bei der Bildung eines Beurteilungspegels muss somit der **Tonhaltigkeitszuschlag** berücksichtigt werden (Lärmbelästigung am Arbeitsplatz durch z.B. Maschinenbrummen).

Residualton

Fehlt bei einer periodischen Schwingung der **Grundton**, **rekonstruiert** unser Gehörsinn **anhand des Obertonspektrums** den fehlenden Ton.

Dieses Phänomen findet beim Orgelbau bereits seit langer Zeit Anwendung. Um sich die große Orgelpfeife zu sparen, werden zwei kleinere Pfeifen gebaut, die exakt die Obertöne des eigentlichen Tons produzieren. Das Gehör rekonstruiert daraus den Grundton.

und mehr...

Das Thema umfasst noch einige Themenfelder mehr, die aber größtenteils schon in der Vorlesung besprochen wurden. Darunter fallen u.a.:

- **Richtungshören**
- **Maskierung** (simultane Verdeckung)
- **Vor- und Nachverdeckung**

Anwendung

Die Erkenntnisse der Psychoakustik finden in einigen **praktischen Bereichen** Anwendung.

- **Messtechnik** (Geräuschbeurteilung)
Zur Bildung von Normen und Gesetzen müssen Geräusche dem Hörempfinden entsprechend beurteilt werden.
- **Audio-Datenkompression**
Informationen die das Gehör nicht wahrnehmen kann werden weggelassen.
 - Verdeckungseffekte
 - tiefe Frequenzen in Mono (Joint-Stereo)
 - Beschränkung auf Hörfläche: Filterung an den Frequenzlimits, Daten unterhalb der „Hörschwelle“ werden weggelassen
- **Medizin**
 - Cochlea-Implantate
 - Verbesserung gewöhnlicher Hörgeräte
- **Audio-Effekte** bei Musikproduktionen und Sounddesign

2. Psychoakustik-Effekte

Psychoakustik-Effekte im Tonstudio lassen sich meist gut über Erkenntnisse über das Gehör und dessen Wahrnehmung erklären.

Dieser Abschnitt handelt von folgenden Effekten:

- **Exciter**
- **Bass Enhancer**
- **Stereo Enhancer**
- **Enhancer, Maximizer, Vitalizer, ...**
- **Transientdesigner**

Exciter

Der erste Exciter wurde 1955 vorgestellt. Der Durchbruch kam aber erst durch den ‚Aural Exciter‘ von ‚Aphex‘ Mitte der 70er. Von diesen begehrten Röhrenexcitern waren damals aber nur wenige auf dem Markt, also wurden sie stundenweise an die großen Studios vermietet. Heutzutage ist genau dieser Exciter neben vielen anderen als Plug-In erhältlich. Beachtlich hierbei ist die originalgetreue Nachempfindung. Die Schrauben unter den vu-Metern regeln die Empfindlichkeit des Drehspulmesswerks.



Abbildung 6: Waves Audio - Plug-In: Aphex Vintage Aural Exciter

Funktionsweise:

Das zu bearbeitende Signal wird **aufgeteilt**, der zu verarbeitende Anteil **hochpassgefiltert** und **verzerrt**, sodass harmonische Obertöne des Signals hinzukommen. Im Anschluss wird dieser Anteil wieder **dezent zum Originalsignal hinzugemischt**. Exciter finden ihre Anwendung als Insert- und Send-Effekt.

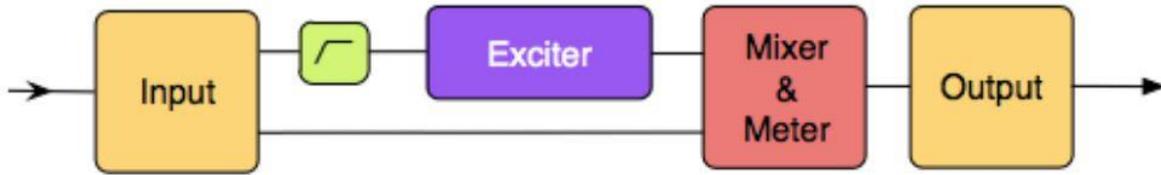


Abbildung 7: Funktionsweise eines Exciters

Wirkung:

Die Klangveränderung von Excitern wird oft als Gewinn von **Präsenz, Klarheit, Räumlichkeit und Transparenz** beschrieben. Beachtlich dabei ist, dass der **Pegel messbar kaum verändert** wird. Gerne werden Exciter deshalb auch für Werbeproduktionen verwendet. Das Signal klingt lauter und präsenter, ist es aber rein messtechnisch nicht. Des Weiteren findet der Exciter seinen Einsatz bei Musikproduktionen auf der Summe und auf Einzelspuren. Aufnahmebedingt dumpfe Signale mit wenig bis keinem Höhenanteil können über einen Exciter erheblich aufgewertet werden. Er kann sowohl einem dumpfen Piano als auch einer höhenarmen Kick neuen Glanz verleihen. Der Unterschied zu einem Equalizer liegt darin, dass der Equalizer bei nicht vorhandenem Obertonspektrum auch keine Obertöne boosten kann. Zusätzlich werden Exciter zur Veredelung und Audio-Restauration genutzt.

Bass Enhancer

Funktionsweise:

Der Bass Enhancer nutzt das **Residualton-Phänomen**. Er **erzeugt Obertöne** aus den **Grundtönen im Bassbereich** und filtert die Grundtöne in einigen Fällen sogar raus. Einige Bass Enhancer nehmen zusätzlich eine Kompression im Bassbereich vor.

Wirkung:

Auch auf **kleinen Lautsprechern** können **satte Bässe** dargestellt werden. Im Sounddesign kann der Effekt genutzt werden um beispielsweise die Stimme, Schüsse oder Explosionen **voluminöser** klingen zu lassen.

Aber Achtung: Wird der Effekt zu viel eingesetzt kann der Mix schnell mumpfig und dumpf klingen.

Stereo Enhancer

Funktionsweise:

Grundsätzlich arbeiten Stereo Enhancer über die **Zumischung phasengedrehter Dopplungen** auf der jeweiligen **Gegenseite**. Häufig werden an den Dopplungen noch **weitere Schritte wie Phasenverschiebung, Filterung, Delays, ...** vorgenommen.

Wirkung:

Das Klangbild kann **über** die von den Lautsprechern dargestellte **Stereobasis hinausgehen**.

Häufig leidet darunter die **Monokompatibilität**. Der Gegenteil in Mono oder ein Blick auf den Korrelationsgradmesser/das Goniometer lohnt sich. Außerdem ist das gewünschte Klangbild dementsprechend **nur im Sweetspot** zu hören.

Enhancer, Maximizer, Vitalizer, ...

Neben den schon genannten klassischen Bauarten gibt es noch **etliche Mischbauweisen**, deren Namen oft auch nicht direkt auf die eindeutigen Effekte schließen lassen.

Funktionsweise:

Enhancer, Maximizer, Vitalizer, ... sind oft **verschiedene Kombinationen** aus Exciter, Bass Enhancer und Stereo Enhancer, bei denen das Signal häufig über Bandpässe **in verschiedene Bänder aufgeteilt** und dort **getrennt bearbeitet** wird.

Der **BBE Maximizer** geht zudem davon aus, dass Lautsprecher bauartbedingt tendenziell die Höhen verzögern. Also **verzögert er tiefe Frequenzen** um dies auszugleichen.

Wirkung:

Von den Herstellern wird die Wirkung oft als **„Magic“** oder **„Vital“** beschrieben. Es fällt also schwer die klangliche Wirkung in Worte zu fassen, zumal jedes Gerät auch eine andere Klangveränderung vornimmt. Auf jeden Fall sollte deshalb solch ein Effekt vor der Anschaffung getestet werden. Eine oft versprochene Wirkung ist, dass der Mix auch bei **kleineren Lautstärken** und **mittenlastigen TV-Lautsprechern und Radios Bässe und Höhen** wiedergibt.

Transientendesigner

Zuletzt soll hier der Transientendesigner erwähnt werden. Er wird meist nicht den psychoakustischen Effekten zugeschrieben, kann aber durchaus die Impulshaltigkeit eines Signals beeinflussen und ist allein in seiner Funktionsweise faszinierend.

Die Erfindung des Transientendesigners wird der Firma **„SPL“** zugeschrieben, die ihn bis heute produziert.



Abbildung 8: SPL Transient Designer

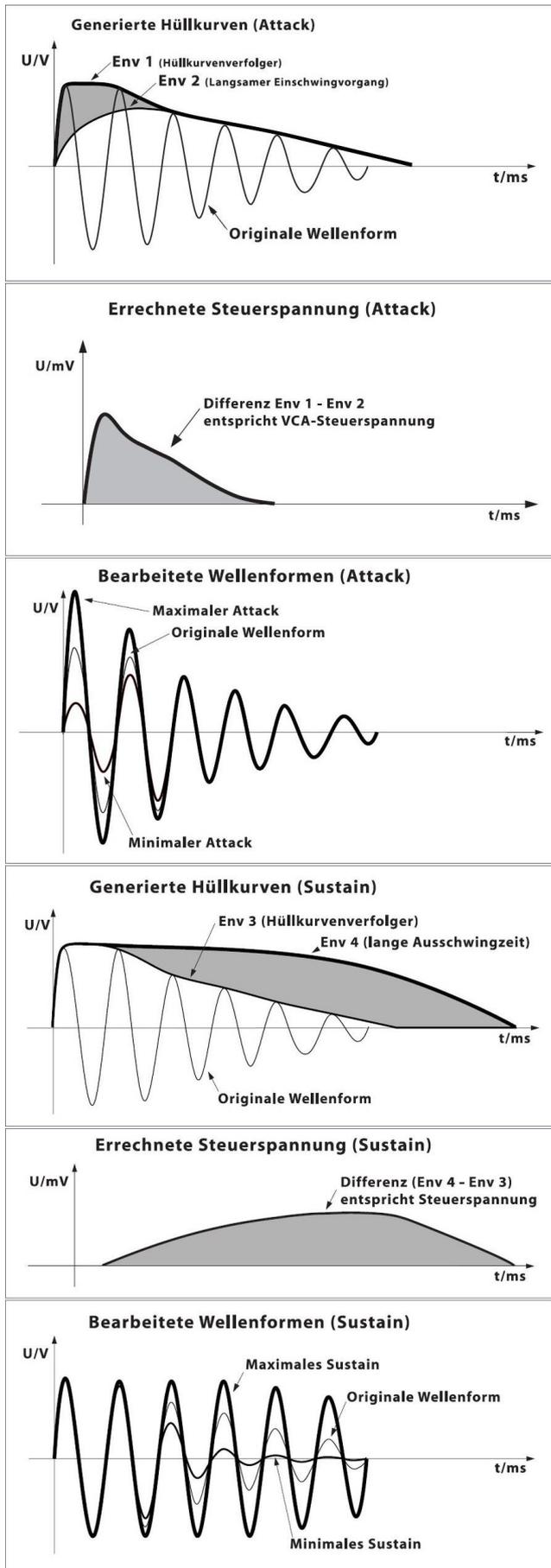


Abbildung 9: Funktionsweise SPL Transient Designer

Funktionsweise:

Beim Transientendesigner können **Attack und Sustain getrennt** voneinander **geregelt** werden. Dabei wird aber nicht die Zeit, wie beim Kompressor, sondern die Intensität der beiden Signalanteile geregelt. Möglich ist dies über ein Attack- und Sustain-Regelnetzwerk, das insgesamt aus vier Hüllkurvengeneratoren besteht.

Attack-Regelnetzwerk:

Zwei Hüllkurvengeneratoren stecken im Attack-Regelnetzwerk. **Envelope 1** hat einen *sehr schnellen Einschwingvorgang* und verfolgt die Hüllkurve des Originalsignals. **Envelope 2** hat hingegen einen *langsamen Einschwingvorgang*. Die **graue Fläche** stellt die **Differenz** beider Kurven dar. Diese Differenzkurve entspricht der VCA-Steuerspannung, die über dem Signal liegt. Der **Attackregler** regelt somit die **Intensität dieser Kurve**.

Sustain-Regelnetzwerk:

Auch im Sustain-Regelnetzwerk stecken zwei Hüllkurvengeneratoren. **Envelope 3** verfolgt wieder die Hüllkurve des Signals (vgl. Envelope 1). **Envelope 4** hat einen *ebenso schnellen Einschwingvorgang* und hält den *Spitzenpegel über eine längere Ausschwingzeit*. Wieder stellt die **graue Fläche die Differenz** aus beiden Kurven dar. Da Envelope 3 und 4 beide einen sehr kurzen Einschwingvorgang haben, fällt die Attack in der Sustain-VCA-Steuerspannung weg. Der **Sustainregler** steuert somit die **Intensität dieser Kurve**.

Zusammenfassend wird das **Signal über die Steuerspannungen** in Attack und Sustain **aufgeteilt**. Nach dem Einschwingvorgang „übergibt die Attack an das Sustain“. Somit können die Lautstärken getrennt voneinander angepasst werden.

Vorteile gegenüber Regelverstärkern (Kompressor, Expander, ...):

Das System arbeitet **Unabhängig von der Lautstärke des Signals**. D.h. **leise und laute Signale** erfahren **dieselbe Hüllkurvenbearbeitung**. Will man beispielsweise die Klicks bei einer Kontrabassaufnahme mit einem Kompressor reduzieren, werden diese bei dynamischem Spiel nicht in gleichem Maße abgesenkt. Will man im Gegensatz dazu den Ausschwingvorgang einer Bassdrum mit einem Gate reduzieren, werden ganz leise Anschläge komplett verschluckt. Gilt es Aufgaben dieser Art zu lösen, kann es sich lohnen einen Transientendesigner zu benutzen. Außerdem haben Regelverstärker teilweise auch zu lange minimale Attackzeiten, um Transienten effektiv zu bearbeiten.

Wirkung:

Transientendesigner werden meist zur **Bearbeitung von Einzelinstrumenten** verwendet. Häufig sind es **perkussive Klänge**, die verändert werden. Ihnen kann mehr **Attack** hinzugefügt und somit ein impuls- und transientenhaltigeres Signal erzeugt werden. Aber auch **Ausklang und Nachhall** können maßgeblich verändert werden.

3. Fazit

Die Beschäftigung eines Tonschaffenden mit Psychoakustik ist grundsätzlich **sinnvoll und wichtig**. Schon angefangen bei empfohlenen Abhörpegeln spielen die Erkenntnisse der Psychoakustik eine große Rolle.

Der Einsatz **psychoakustischer Effekte** ist mit **Vorsicht** zu genießen, doch in Maßen kann er tolle Ergebnisse liefern. Es ist nie verkehrt, Stereo Enhancer auf Mono-Kompatibilität und auch den Exciter später noch einmal gegenzuprüfen. Oft kann man gar nicht genug Effekt kriegen und schraubt mit etwas Abstand den Effekt doch wieder auf ein gesundes Maß zurück. Gerade bei Mischbauformen wie den Enhancern, Maximizern usw. sollte sich jeder sein eigenes Urteil bilden, da doch oft sehr undurchsichtig ist, welche Bearbeitungsschritte das Gerät am Signal vornimmt.

Nichtsdestotrotz verbergen sich gerade hinter **Exciter** und **Transientendesigner** wichtige Tools, die das Material erheblich aufwerten können und in den Tonstudios nicht umsonst zu **unverzichtbaren Werkzeugen** geworden sind.

4. Quellen

Literatur

- *Handbuch der Tonstudioteknik* (8. Auflage) – Michael Dickreiter
 - 3 Schallwahrnehmung
 - 6.3.4 Enhancer
 - 6.7.1 Zusammenhang von Reiz- und Wahrnehmungsmerkmalen
 - 12.2.1 Psychoakustische Grundlagen
 - 18.3.3 Gehörbasierte objektive Messverfahren
- *Perfect Vocals* – Christian Preissig - [S.117-119:] 5. Nachbearbeitung → Psychoakustische Effekte
- *Effekte & Dynamics* (3. Auflage) – Thomas Sandmann – [S. 115-122:] 8. Exciter und Enhancer
- *Effekte-Praxis im Tonstudio* (2017) – Raik Johne
- *Audiodesign* (2. Auflage) – Hannes Raffaseder – [S. 103-128:] 5. Aspekte der Wahrnehmung
- *Mixing Audio* – Roey Izhaki – [S. 471-474:] Exciters and enhancers; Transient designers

Internet

- <https://www.fairaudio.de/dwt/artikel/2014-artikel/psycho-akustik-artikel-1.html>
- <https://www.fairaudio.de/dwt/artikel/2014-artikel/psycho-akustik-artikel-2.html>
- <https://www.fairaudio.de/dwt/artikel/2014-artikel/psycho-akustik-artikel-3.html>
- <https://www.fairaudio.de/dwt/artikel/2014-artikel/psycho-akustik-artikel-b1.html>
- <https://www.fairaudio.de/dwt/artikel/2014-artikel/psycho-akustik-artikel-b2.html>
- <https://www.fairaudio.de/dwt/artikel/2014-artikel/psycho-akustik-artikel-b3.html>
- <https://www.fairaudio.de/dwt/artikel/2014-artikel/psycho-akustik-artikel-b4.html>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Psychoakustik>
- <http://slideplayer.org/slide/8972411/26/images/34/Basilmembran+Resonanzfrequenzkarte+entlang+der+Basilmembran.jpg>
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Rauhigkeit_\(Akustik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Rauhigkeit_(Akustik))
- http://www.netaudio.de/psychoakustik/Daten/kritische_Bandbreiten/rauhigkeit.htm
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Residualton>
- <http://www.sengpielaudio.com/BerechnungDerBewertungsfilter.pdf>
- <https://www.soundandrecording.de/tutorials/basis-wissen-effekte-im-ueberblick/>
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Exciter_\(Gerät\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Exciter_(Gerät))
- <http://www.practical-music-production.com/aural-exciter.html>
- <https://www.waves.com/1lib/pdf/plugins/aphex-vintage-aural-exciter.pdf>
- <https://www.soundonsound.com/techniques/choosing-using-enhancement-plug-ins>
- https://www.infrared.eca.ed.ac.uk/_getResource.cfm?id=17140
- https://images.static-thomann.de/pics/atg/atgdata/document/misc/130203_spl_9842tech.pdf