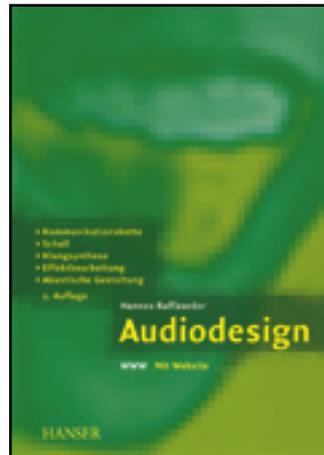


HANSER



Leseprobe

Hannes Raffaseder

Audiodesign

Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung,
Akustische Gestaltung

ISBN: 978-3-446-41762-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41762-5>

sowie im Buchhandel.

2 Beschreibung der Signalkette

Die Gestaltung von akustischen Kommunikationsketten zur bestmöglichen Übertragung bestimmter Nachrichten und Informationen ist eine wesentliche Aufgabe von Audiodesign. Die Art der Nachricht oder der Information kann vielfältig sein. Es kann sich um ein Geräusch genauso handeln wie um einen Rhythmus, eine Melodie, ein ganzes Musikstück, einen Klang oder Sprache usw. Eine von den konkreten Anforderungen zunächst weitgehend unabhängige Beschreibung sowohl der Schallergebnisse selbst als auch der einzelnen Glieder stellt eine wichtige Voraussetzung für die Gestaltung dar.

2.1 Beschreibung von Signalen

Die physikalische Repräsentation der zu übermittelnden Information wird als Signal bezeichnet. Wie in Abschnitt 1.11 dargestellt, kann sich die Energieform des Signals entlang der Kommunikationskette auch mehrmals ändern. Die Eigenschaften sollten aber unabhängig von der Energieform beschrieben werden können. Mit Amplitude, Grundfrequenz und Signalform bzw. Spektrum wurden die wichtigsten physikalischen Kenngrößen bereits im Abschnitt 1.8 kurz erläutert.

Werden zusammengesetzte Schallsignale wie Sprache oder Musik außer Acht gelassen, so können akustische Ereignisse erfahrungsgemäß in zwei große Gruppen eingeteilt werden: Klänge und Geräusche. Im Abschnitt 1.7 wurde festgehalten, dass Klängen stets Lautstärke, Tonhöhe und Klangfarbe bzw. die entsprechenden physikalischen Parameter Amplitude, Frequenz und Signalform eindeutig zugeordnet werden können. Im Folgenden soll dieses erste Unterscheidungskriterium etwas näher untersucht und ausgebaut werden.

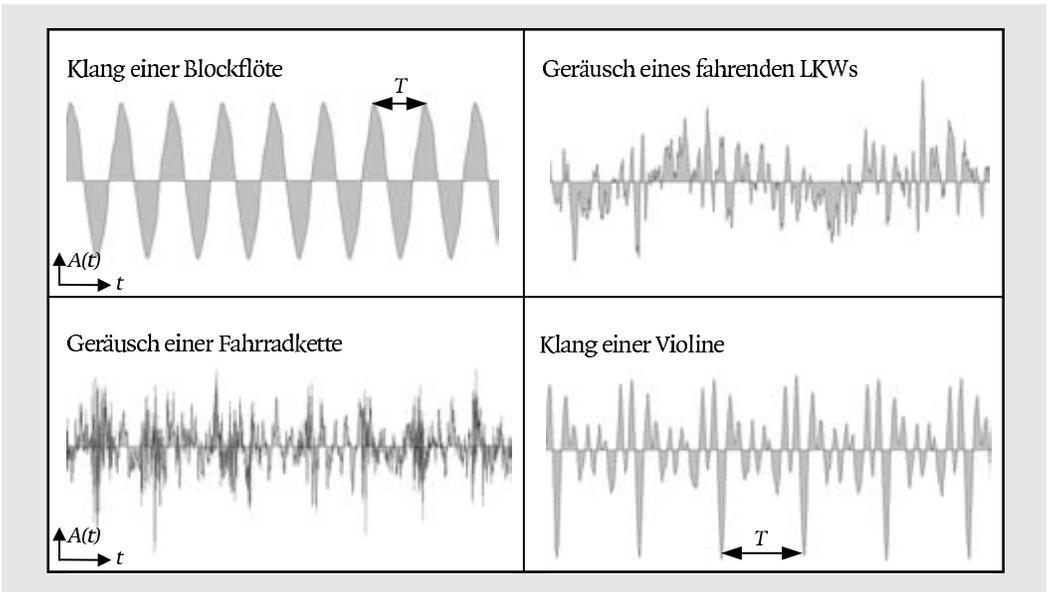


Abb. 2.1
Signalformen von Klängen
und Geräuschen

2.1.1 Periodisch oder aperiodisch

Bei näherer Betrachtung der Signalformen unterschiedlicher Klänge und Geräusche fällt rasch auf, dass Klänge zumindest annähernd regelmäßige, sich mehr oder weniger gleichförmig wiederholende Abschnitte aufweisen. Die Formen von Geräuschen erscheinen hingegen völlig unstrukturiert.

Wiederholt sich die Form eines Signals nach einer bestimmten Zeitdauer T identisch, so ist das Signal *periodisch*. Für periodische Signale $s(t)$ gilt somit definitionsgemäß:

$$s(t) = s(t + T)$$

Die Zeitdauer T wird, wie schon in Abschnitt 1.8.3 erwähnt, als Periodendauer oder auch kurz als Periode der Schwingung bzw. des Signals bezeichnet. Sieht man von einigen elektronisch erzeugten Ausnahmen ab, so wird die Beziehung $s(t) = s(t+T)$ auch von Klängen nie exakt, sondern stets nur näherungsweise erfüllt. Da aber Dauer und Form der einzelnen Schwingungsperioden nur wenig voneinander abweichen, wird meist von *quasiperiodischen* Signalen gesprochen. Die Grundfrequenz entspricht dann dem Reziprokwert der mittleren Periodendauer.

Bei Geräuschen weist die Signalform keine gleichförmigen Wiederholungen ihrer Form auf. Solche Signale, die diese Bedingung für Periodizität nicht einmal näherungsweise erfüllen, werden auch *aperiodisch* genannt. Definitionsgemäß kann für ein aperiodisches Signal keine Periodendauer und somit auch keine Grundfrequenz bestimmt werden. (▶)



▶ **Siehe Webseite zum Buch**

2.1.2 Harmonische Töne

Von einem harmonischen Ton wird dann gesprochen, wenn das Signal durch die Winkelfunktionen Sinus und Kosinus beschrieben werden kann. Ein harmonischer Ton ist immer periodisch. In der Natur kommen harmonische Töne selten vor, da sie nur als Folge einfachster Schwingungssysteme, wie Feder-Masse-System, Pendel, aus Spule und Kondensator bestehender elektronischer Schwingkreis oder Stimmgabel, zu hören sind. Allerdings können sie – wie in der Folge gezeigt wird – als Grundbausteine jeder beliebigen anderen Signalform angesehen werden und sind dabei von fundamentaler Bedeutung.

Harmonische Töne sind die Grundbausteine jedes beliebigen Schallsignals.

2.1.3 Komplexe Töne – Klänge

Der französische Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier konnte zeigen, dass sich jedes periodische Signal aus harmonischen Teiltönen zusammensetzen lässt, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz des Signals sind. Die Teiltöne eines Schallsignals werden auch als Grundton und Obertöne bezeichnet. Der Grundton entspricht dem Teilton mit der Grundfrequenz, der erste Oberton jenem mit der zweifachen, der zweite jenem mit der dreifachen Grundfrequenz usw. Ein periodisches Schallsignal wird im physikalischen bzw. akustischen Kontext auch als *harmonisch komplexer Ton* bezeichnet und kann mathematisch folgendermaßen beschrieben werden: (▶)



▶ **Siehe Webseite zum Buch**

$$s(t)_{\text{HKT}} = \sum_{n=1}^{\infty} S_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot t + \varphi_n)$$

Die Amplitudenfaktoren S_n können dabei auch gleich null sein. Auch der Grundton muss nicht zwingend im Signal enthalten sein. Die Grundfrequenz und somit die wahrgenommene Tonhöhe des Schallsignals entspricht aber immer – also auch dann, wenn der Grundton selbst im Signal gar nicht enthalten ist – dem größten gemeinsamen Teiler aller am Signal beteiligten Teilfrequenzen.

Aus der menschlichen Hörerfahrung sind viele Schallereignisse bekannt, bei denen sich die Tonhöhe zwar nicht exakt bestimmen lässt, die aber trotzdem einen ausgeprägten klanglichen Charakter aufweisen und daher kaum als Geräusch bezeichnet werden. Wichtige Beispiele für solche Schallereignisse sind Klänge von Glocken, Pauken, Gongs etc. Diese Schallsignale setzen sich meist zwar ebenfalls aus mehreren harmonischen Teiltönen zusammen, ihre Teilfrequenzen sind aber keine ganzzahligen Vielfachen einer Grundfrequenz. Diese wichtige Erkenntnis, dass Klänge durch Addition mehrerer harmonischer Töne zusammengesetzt werden können, wird bei der *additiven Klangsynthese* in die Praxis umgesetzt. (▶)

▶ Siehe Abschn. 9.3.1

2.1.4 Das Frequenzspektrum

Da sich Klänge aus einzelnen harmonischen Tönen zusammensetzen, können sie durch deren Amplitudenfaktoren S_n und die zugehörigen Frequenzen f_n beschrieben werden. Die konkrete Zusammensetzung bestimmt die Signalform und ist daher gemäß Abschnitt 1.9 auch ein wichtiges Kriterium für die Klangfarbe. Die Amplituden der Teiltöne sind demnach bedeutende Eigenschaften von Schallsignalen, obwohl sie sich aus der Signalform nicht direkt ermitteln lassen.

Um rasch feststellen zu können, welche Teiltöne wie stark im Signal enthalten sind, ist es daher sinnvoll, statt dem zeitlichen Verlauf $s(t)$ des Signals gleich die Amplitudenfaktoren in Abhängigkeit von ihren Frequenzen zu betrachten. Diese Art der Darstellung wird als *Frequenzspektrum* $S(f)$ oder auch nur kurz *Spektrum* des Signals bezeichnet.

Das Spektrum eines harmonischen Tones besteht definitionsgemäß immer aus einer einzigen Spektrallinie. Da sich periodische Signale aus mehreren harmonischen Tönen zusammensetzen, muss sich auch ihr Spektrum aus einer Anzahl von Spektrallinien zusammensetzen. Da Klänge zumindest quasiperiodisch sind, können sie näherungsweise durch ein diskretes Linienspektrum beschrieben werden. Allerdings führen die Abweichungen von der Periodizität zu einer mehr oder weniger starken Verbreiterung der Linien, die so zu stark ausgeprägten Maxima im Spektrum werden. (▶)

Sinus, Dreieck, Rechteck, Sägezahn und Rauschen stellen für Audio-technik und -design wichtige Basissignale dar, die u.a. bei der im Abschnitt 9.3 behandelten subtraktiven Klangsynthese eine entscheidende Rolle spielen. Ihre Signalformen, Spektren und die sich daraus ergebenden akustischen Eigenschaften werden auf der Webseite zum Buch ausführlich dargestellt. (▶)

Im Spektrum eines Signals werden die Amplituden und Frequenzen der Teiltöne dargestellt.

Das Spektrum von Klängen ist näherungsweise linienförmig.

▶ Siehe Webseite zum Buch



▶ Siehe Webseite zum Buch

2.1.5 Geräusche

Wie im Abschnitt 1.3.2 bereits erwähnt, ist es nicht möglich, für Geräusche eine eindeutige Grundfrequenz zu bestimmen. Aperiodische Signale können daher auch nicht durch additive Überlagerung harmonischer Teiltöne beschrieben werden, deren Frequenzen einem Vielfachen ihrer Grundfrequenz entsprechen. Das Spektrum eines Geräuschs kann daher keinesfalls diskret und linienförmig sein.

Trotzdem ist es möglich und sinnvoll, auch für ein Geräusch ein Frequenzspektrum anzugeben, das dessen Zusammensetzung beschreibt und als Kriterium für die Klangfarbe angesehen werden kann. Da bei periodischen Signalen der Abstand zwischen zwei Spektrallinien immer ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz betragen muss, liegen die Spektrallinien umso enger beisammen, je kleiner die Grundfrequenz bzw. je größer die Periodendauer ist. Der Übergang zu einem aperiodischen Signal könnte gedanklich so vollzogen werden, dass die Periodendauer als unendlich angenommen wird. Da der Abstand zwischen den Spektrallinien dann gleich null sein muss, wird aus den diskreten Linien ein kontinuierliches Spektrum, das charakteristisch für Geräusche ist. Mathematisch betrachtet, wird dabei aus der Summe der in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Fourier-Reihe ein Integral: Die *Fourier-Transformation*.

Als spezielles Geräusch spielt *Rauschen* in Audiotechnik und -design einerseits als unvermeidbare Störgröße eine Rolle, ist aber andererseits auf Grund seiner besonderen Eigenschaften auch ein wichtiges Basissignal in der elektronischen Klangsintese.

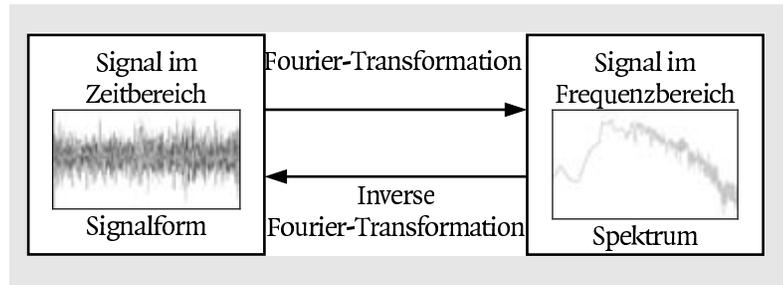
Weißes Rauschen ist definitionsgemäß dadurch gekennzeichnet, dass statistisch gemittelt alle Frequenzen in gleicher Intensität zu diesem Signal beitragen. Es stellt somit den Gegenpol zu einem harmonischen Ton mit einer einzigen Frequenzkomponente dar. Das Spektrum von weißem Rauschen ist über den gesamten Frequenzbereich konstant. Bei *rosa Rauschen* nimmt die Intensität hingegen pro Frequenzverdoppelung um 3 dB ab.

Ein wichtiges Unterscheidungskriterium für Geräusche ist, welche Bereiche sie im Frequenzspektrum beanspruchen. Weist das Spektrum über einen weiten Bereich nennenswerte Anteile auf, so spricht man von Breitband-Geräuschen. Konzentriert sich das Spektrum hingegen auf einen vergleichsweise engen Frequenzbereich, so handelt es sich um schmalbandige Geräusche. Beispielsweise kann zwischen den geräuschhaften Sprachlauten „SCH“ und „S“ vor allem aufgrund deren Bandbreite unterschieden werden. Je schmalbandiger das Spektrum ist, desto mehr nähert es sich einer Spektrallinie an. Schmalbandige Geräusche können

Das Spektrum von Geräuschen hat einen kontinuierlichen Verlauf.

Weißes Rauschen, das definitionsgemäß alle Frequenzen mit gleicher Amplitude enthält, stellt den Gegenpol zu einem harmonischen Ton mit einer einzigen Frequenz dar.

Abb. 2.2
Zeit- und Frequenzbereich



► Siehe Webseite
zum Buch

daher auch Tonhöhenempfindungen auslösen oder zumindest einem Frequenzbereich zugeordnet werden. So wird zum Beispiel von hohem Zischen und tiefem Rumoren gesprochen. (▶)

2.1.6 Fourier-Transformation, Zeit- und Frequenzbereich

Mit Hilfe der Fourier-Transformation ist es möglich, für jedes beliebige Signal das entsprechende Spektrum zu ermitteln. Es lässt sich auf diese Weise feststellen, welche Frequenzen bzw. welche Frequenzbereiche wie stark im Signal enthalten sind. Es ist also möglich, über die Fourier-Transformation eines Signals aus dessen Zeitbereich in dessen Frequenzbereich zu gelangen. Beide Signalbeschreibungen stehen gleichwertig nebeneinander. Die inverse Fourier-Transformation ermöglicht umgekehrt, aus dem Spektrum des Signals den entsprechenden Zeitverlauf zu ermitteln.

Mit der *Fast Fourier Transformation* (FFT) steht ein effizienter Algorithmus zur Verfügung, der in einigen aktuellen Softwarepaketen für die Audiotbearbeitung implementiert ist. Zu beachten ist dabei, dass die Frequenzauflösung dieses Algorithmus nicht beliebig genau ist, sondern über die so genannte FFT-Size beeinflusst werden kann. Je größer diese gewählt wird, desto genauer ist das berechnete Spektrum.

Genau genommen kann ein Signal entweder im Zeit- oder im Frequenzbereich betrachtet werden. Zu beachten ist, dass in der zeitlichen Darstellung keine Information über die spektrale Zusammensetzung und umgekehrt im Spektrum keine Zeitinformation enthalten ist. Das heißt, dass im Spektrum nur erkannt werden kann, wie stark eine bestimmte Frequenz in einem Signal enthalten ist, jedoch nicht wie lange.

Nur spezielle Zeit-Frequenz-Darstellungen wie zum Beispiel das Spektrogramm ermöglichen meist mittels Pseudo-3D-Diagramm gleichzeitig sowohl den zeitlichen Verlauf als auch die spektrale Zusammensetzung eines Signals zu betrachten. Dies ist aber nicht mit beliebiger Genauigkeit möglich. Vereinfacht ausgedrückt, wird bei diesen Darstellungen

Die Fast Fourier Transformation (FFT) ist ein effizienter Algorithmus zur Berechnung des Spektrums eines digitalen Signals.

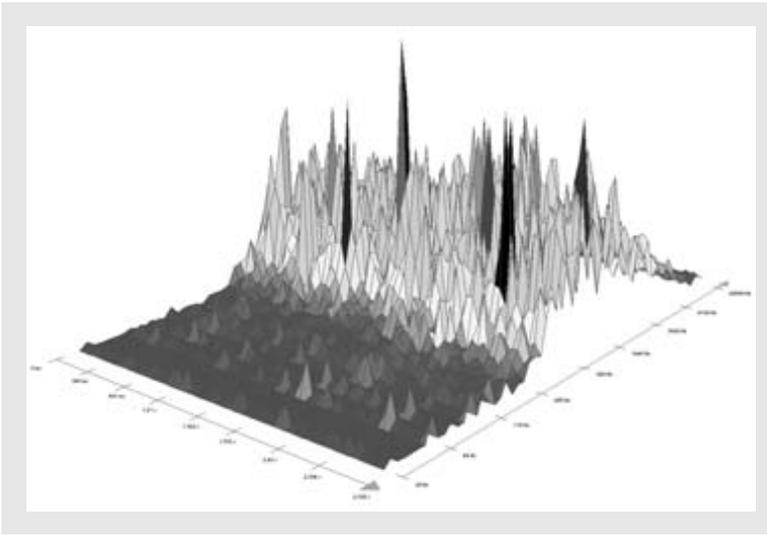


Abb. 2.3
Spektrogramm des
Geräusches eines rau-
schenden Baches

das Signal in kurze zeitliche Abschnitte zerlegt und für diese dann das Spektrum berechnet. Je länger diese Abschnitte sind, desto schlechter ist zwar die zeitliche Auflösung, desto besser aber die Frequenzauflösung.

2.1.7 Gliederung des Frequenzbereichs

Der mit dem menschlichen Gehör erfassbare Frequenzbereich wird zunächst grob in drei große Bereiche unterteilt: Bässe, Mitten und Höhen. Der Bassbereich reicht von 20 bis etwa 250 Hz, die tiefen Mitten erstrecken sich von ca. 250 bis 2000 Hz und die hohen Mitten von 2 kHz bis 4 kHz. Der Bereich der Höhen liegt oberhalb von 4 kHz. Die Tonhöhen bzw. die Grundfrequenzen gebräuchlicher Musikinstrumente fallen in einen Frequenzbereich von etwa 25 bis zu 3500 Hertz.

Die Klangfarben akustischer Ereignisse werden oft durch Adjektive wie dumpf, hohl, warm, brillant, schrill, metallisch, hölzern, durchdringend usw. charakterisiert. Eine Zuordnung von technisch messbaren Parametern zu solchen verbalen Beschreibungen wäre zwar für das Audiodesign überaus hilfreich, gelingt bisher aber bestenfalls in Ansätzen. Einerseits sind verbale Beschreibungen mehr oder weniger subjektiv geprägt, andererseits fehlen aber auch umfassende wissenschaftliche Untersuchungen dieser Frage. Falls gelegentlich doch solche Zuordnungen versucht werden, so beruhen diese vor allem auf praktischen Erfahrungen von Tontechnikern oder Arrangeuren.

Ein dumpfer Klang weist in der Regel vergleichsweise wenige Anteile im höheren Frequenzbereich auf. Liefert der hohe Frequenzbereich hin-

gegen noch wichtige Beiträge zum akustischen Ereignis, so wird dieses als brillant wahrgenommen. Sind die hohen Frequenzen zu stark ausgeprägt, so wird das Signal als schrill empfunden. Bei einem metallischen Klang sind die Teiltöne nicht exakt ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz, sondern leicht gegeneinander verstimmt.

2.1.8 Der zeitliche Verlauf von Schallsignalen



► **Siehe Webseite
zum Buch**

Mikroskopischer Zeitbereich:
 $0,05 \text{ ms} < t < 50 \text{ ms}$

Zeitbereich der Transienten:
 $50 \text{ ms} < t < 150 \text{ ms}$

Makroskopischer Zeitbereich: $t > 150 \text{ ms}$

Bei der Untersuchung von Schallsignalen spielen zumindest drei unterschiedliche Zeitbereiche eine Rolle: der mikroskopische Zeitbereich, der Zeitbereich der Transienten und der makroskopische Zeitbereich. (▶)

Die eigentlichen Schwingungen und Wellen, die lokalen Druckschwankungen im Ausbreitungsmedium, werden durch den so genannten *mikroskopischen Zeitbereich* zwischen 0,05 und 50 Millisekunden beschrieben. Zur Beschreibung der Vorgänge in diesem Bereich eignet sich im Allgemeinen das Spektrum besser als der Zeitverlauf.

Bei fast allen Schallereignissen sind Frequenzen und Amplituden nicht konstant, sondern verändern sich ständig innerhalb bestimmter Grenzen. Diese geringfügigen Variationen der Signaleigenschaften werden im *Zeitbereich der Übergangsklänge oder Transienten* zwischen 50 und ca. 150 Millisekunden beschrieben.

Auch die Einschwingphase vom Beginn eines Signals bis zum Erreichen der maximalen Amplitude kann meist in diesem Zeitbereich beschrieben werden. Sie ist für das Erkennen bestimmter Schallsignale – vor allem von manchen Instrumenten – von großer Bedeutung.

Um die Struktur von Klängen oder Geräuschen erfassen zu können, müssen freilich noch größere Zeitintervalle betrachtet werden. Die Beschreibung des zeitlichen Gesamtverlaufes erfolgt im *makroskopischen Zeitbereich*. Dieser kann von ca. 150 Millisekunden bei einem kurzen, perkussiven Klang bis zu mehreren Stunden bei einer langen Oper, die ja schließlich ebenso als akustisches Ereignis aufgefasst werden kann, reichen. Formaler Aufbau eines Musikstücks, Tempo, Metrum und Rhythmus fallen ebenso in diesen Zeitbereich wie die Hüllkurve, die den Verlauf der Amplitude eines Schallereignisses beschreibt.

Die Hüllkurve kann grob in die vier Phasen Attack, Decay, Sustain und Release unterteilt werden. Dieses vierphasige, auch als ADSR-Hüllkurve bezeichnete Modell vereinfacht die realen Verhältnisse natürlicher Schallereignisse zwar meist stark, ermöglicht aber ein besseres Verständnis der zeitlichen Struktur.

Die Dauer der so genannten Einschwingphase wird durch die *Attack-Time* t_A bestimmt. Am Ende dieser Phase erreicht die Hüllkurve eines

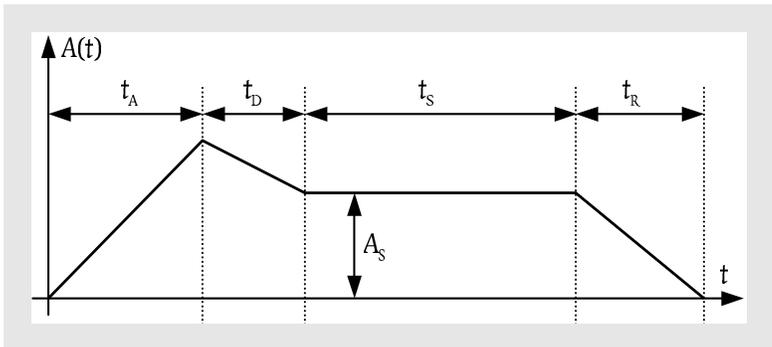


Abb. 2.4
ADSR-Hüllkurve

akustischen Ereignisses ihr Maximum. Bei angeschlagenen oder angezupften Klängen ist die Attack-Time im Allgemeinen recht kurz. Angeblasene oder gestrichene Klänge erreichen ihr Amplitudenmaximum hingegen erst nach einer etwas längeren Zeit.

Unmittelbar an den Einschwingvorgang anschließend folgt eine erste Dämpfungsphase, in der die Eigenschwingungen des Systems abklingen. Ihre Dauer wird als *Decay-Time* t_D bezeichnet. Alle Schallsignale, die nicht, wie bei Streich- oder Blasinstrumenten, andauernd in Schwingung gehalten werden, sondern nur durch eine einmalige Anregung ausgelöst werden, enden nach dieser Phase. Perkussive Klänge haben somit meist nur eine zweiphasige Hüllkurve.

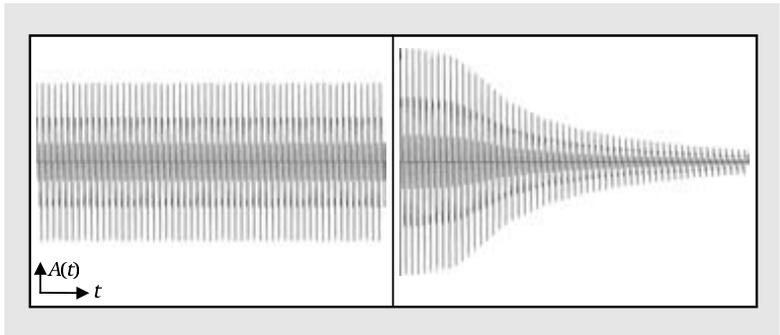
Die *Sustain-Time* t_S gibt die Dauer der dritten Phase der Amplitudenhüllkurve eines Schallsignals an. Sie wird als Aushaltphase oder als quastationärer Abschnitt des akustischen Ereignisses bezeichnet. Die externe Anregung des Klanges ist in diesem Abschnitt ein wesentlicher klangbestimmender Faktor. Die Amplitude bleibt während der *Sustain-Time* zumindest annähernd konstant und wird als *Sustain-Level* bezeichnet. Da sich im Allgemeinen auch die Zusammensetzung des Schallsignals in dieser Phase nur wenig ändert, kann die Aushaltphase gut durch das Spektrum dargestellt werden.

Nach Beendigung der externen Anregung folgt die Ausklingphase des Schallsignals, deren Dauer durch die *Release-Time* t_R beschrieben wird. Ein Schallereignis endet im Allgemeinen nicht abrupt, sondern verklingt allmählich. Die *Release-Time* wird dabei einerseits durch die Dämpfung des Schwingungssystems und andererseits durch die Nachhallzeit des Raumes bestimmt.

2.1.9 Effektivwert und Pegel eines Signals

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Schallsignalen ist ihre Lautstärke, die gemäß Abschnitt 1.8 von der Amplitude des Signals abhängig ist. Werden die Lautstärken unterschiedlicher Schallereignisse verglichen und dabei die Amplituden betrachtet, so lässt sich feststellen, dass nicht die maximale, sondern eher die durchschnittliche Amplitude entscheidend ist. Die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts aller Momentanamplituden wird bei Schwingungen aber kaum zum Ziel führen, da sich positive und negative Signalwerte gegenseitig aufheben. Um die mittlere Amplitude von Signalen trotzdem vergleichen und beurteilen zu können, wurde daher der so genannte *Effektivwert* eingeführt. Das Signal wird bei der Effektivwertbildung zunächst quadriert, sodass keine negativen Anteile mehr auftreten können. Dann wird der Mittelwert des quadrierten Signals gebildet und anschließend die Quadratwurzel daraus gezogen, um die Quadrierung wieder rückgängig zu machen.

Abb. 2.5
Die durchschnittliche Amplitude als Maß für die empfundene Lautstärke



Der Effektivwert ermöglicht einen gemittelten Vergleich von Signalamplituden und unterscheidet sich i. A. vom Maximalwert.

$$s_{\text{effektiv}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}$$

Um die Stärke eines Signals richtig einschätzen und bewerten zu können, muss es meist mit einem Referenzwert verglichen werden. Denkbar wäre zum Beispiel ein Vergleich zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße eines Systems oder ein Vergleich mit einem gegebenen Normwert.

Das Verhältnis von zwei Größen stellt eine geeignete mathematische Relation für derartige Vergleiche dar. Da die zu vergleichenden Werte unter Umständen auch sehr stark voneinander abweichen können und ihr Verhältnis somit sehr groß bzw. klein sein kann, werden solche Verhältnisse im Allgemeinen logarithmiert. Das logarithmische Verhältnis zweier Leistungsgrößen wird als *Pegel* bezeichnet.