

1 Der Schall



Im ersten Kapitel geht es um die Schallausbreitung in der Luft und die Grundlagen zur periodischen Schwingung. Einordnung dieser Themen im Rahmenlehrplan: „Physikalische und physiologische Grundlagen der Akustik“ im ersten Lehrjahr.

1.1 Schallausbreitung

Schall ist physiologisch betrachtet eine Reizung des Gehörs und damit eine Hörempfindung. Physikalisch ist damit die Ausbreitung lokaler Druckschwankungen in elastischen Medien und die kollektive Schwingung von Teilchen gemeint. Ohne Medium (Gas, Flüssigkeit oder Festkörper) gibt es keinen Schall. Demnach wird im luftleeren Raum, dem Vakuum, kein Schall übertragen.

Wie entsteht eine Schallwelle?

Schallwellen können durch verschiedene Schallquellen in Form von schwingenden Saiten, Stäben, Zungen, Membranen, Platten oder Luftsäulen verursacht werden.

Beispiel: Eine Akustikgitarre als Schallquelle

Die Saiten der Gitarre bewegen sich nach dem Anzupfen hin und her, sie schwingen. Die Schwingungen der Saiten werden über den Steg an einen Resonanzkörper, den Gitarrenkorpus, weitergeleitet. Die Holzdecke des Korpus kann als eine Art Platte oder Membran gesehen werden, welche die Schallschwingungen durch die relativ große Fläche verstärkt und an die Luft überträgt (Abb. 1.1). Die periodischen Auslenkungen der angeregten Luftmoleküle breiten sich dann als Schallwelle aus.

Schall in der Luft ...

... breitet sich als Longitudinalwelle aus, damit entspricht die Schwingungsrichtung der Moleküle der Ausbreitungsrichtung der Welle (Abb. 1.2).

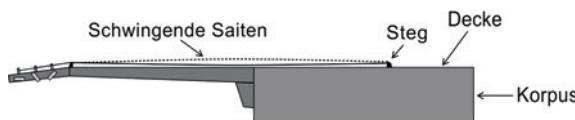


Abb. 1.1: Gitarre als Schallerzeuger.

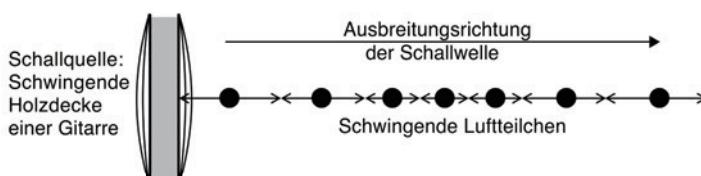


Abb. 1.2: Longitudinalwelle.

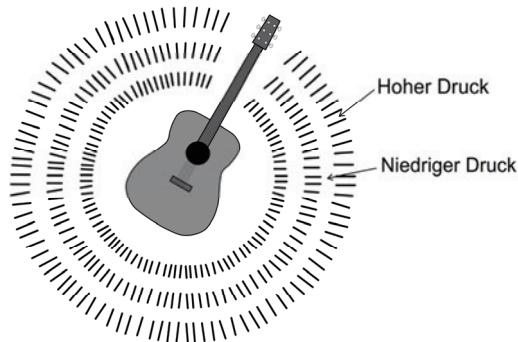


Abb. 1.3: Verdünnungs- und Verdichtungsfronten bei Schallausbreitung in Luft.

Bei Transversalwellen ist die Schwingungsrichtung dagegen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, zum Beispiel bei elektromagnetischen Wellen. Weiterhin gibt es Dehn- und Biegwellen in Festkörpern.

Die Ausbreitung von Schall erfolgt in einem elastischen Medium wie Luft in Form von Verdünnungs- und Verdichtungsfronten (Abb. 1.3):

Verdünnungsfront = niedriger Druck (unkomprimierte Luft).

Verdichtungsfront = hoher Druck (komprimierte Luft).

Nahfeld und Fernfeld

Im Nahfeld um eine Schallquelle breitet sich der Schall in Form einer Kugelwelle aus, solange die Wellenlänge größer ist als der Schallerzeuger. (Die Definition der Wellenlänge folgt in Kapitel 1.2.1) Im Fernfeld, also in größerer Entfernung zur Schallquelle, entsprechen die Schallwellen immer mehr einer ebenen Welle wie in Abb. 1.4 skizziert.

Im Nahfeld und Fernfeld gelten jeweils andere Gesetzmäßigkeiten für den Schalldruck und die Schallschnelle. (Mehr dazu in Kap. 2.)

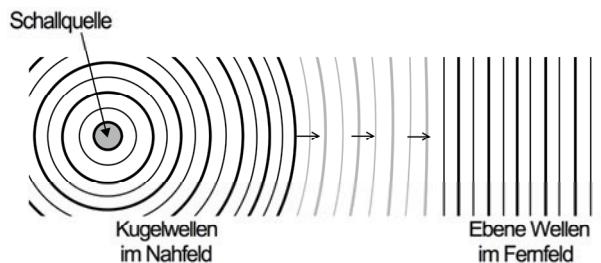


Abb. 1.4: Kugelwellen und ebene Wellen.

Die Schallgeschwindigkeit c ...

... ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Anregung von Teilchen, also von Molekülen oder Atomen, in einem Medium ausbreitet. Da über die Schallgeschwindigkeit einige Irrtümer verbreitet sind, soll hier etwas genauer darauf eingegangen werden.

Die Schallgeschwindigkeit in Luft lässt sich wie folgt berechnen:

$$c_0 = \sqrt{\frac{p_0 \cdot \kappa}{\rho}} \quad (\text{Formel 1.1})$$

c_0 : Schallgeschwindigkeit in m/s bei 0 °C

p_0 : mittlerer statischer Luftdruck in Pa

ρ : mittlere Dichte der Luft in kg/m³

κ : Adiabatenexponent

Luftdruck und Dichte sind physikalische Größen, die per Messung bestimmt werden können, aber was hat es mit dem Adiabatenexponenten κ auf sich? Nach Pierre-Simon Laplace (1749–1827) ist der Wärmefluss von einem komprimierten zu einem unkomprimierten Bereich in einem Gas, also auch der Luft, vernachlässigbar, solange die Wellenlänge (s. Kap. 1.2.1) groß im Vergleich zur mittleren freien Weglänge der Teilchenbewegung ist. Es findet dann fast kein Wärmetausch statt, und man spricht von einer *adiabatischen* Zustandsänderung. Erst wenn sich die Wellenlänge der mittleren freien Wegstrecke nähert, tritt eine deutliche Absorption des Schalls auf – doch die Wellenlängen sind dann so klein, dass der Schall außerhalb des für Menschen hörbaren Bereichs liegt. Auch Siméon Denis Poisson (1781–1840) kannte diesen Zusammenhang und leitete zudem einige Gesetzmäßigkeiten aus dem *idealen Gasgesetz* ab. Das ideale Gasgesetz lautet folgendermaßen:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{Formel 1.2})$$

p : Druck in Pa

V : Volumen in m³

n : Stoffmenge in mol

R : Universelle Gaskonstante $R \approx 8,314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$

T : Temperatur in K

Poisson erkannte folgende Zusammenhänge:

$$p \cdot V^\kappa = \text{konstant} \quad (\text{Formel 1.3})$$

$$T \cdot V^{\kappa-1} = \text{konstant} \quad (\text{Formel 1.4})$$

$$p^{1-\kappa} \cdot T^\kappa = \text{konstant} \quad (\text{Formel 1.5})$$

Hier taucht also zum ersten Mal der Adiabatenexponent κ auf, der letztlich so definiert ist:

$$\kappa = c_p \cdot c_v \quad (\text{Formel 1.6})$$

c_p : molare Wärmekapazität in J bei konstantem Druck

c_v : molare Wärmekapazität in J bei konstantem Volumen

Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft in Abhängigkeit von der Temperatur

Der atmosphärische Normaldruck p_0 hat einen Wert von 101 325 Pa. Bei einer Temperatur von 0 °C beträgt die Dichte der Luft $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$. Der Adiabatenexponent der Luft hat bei gleich bleibender Temperatur einen Wert von 1,402. Daraus folgt unter Zuhilfenahme von Formel 1.1:

$$c_0 = \sqrt{\frac{p_0 \cdot \kappa}{\rho}} = \sqrt{\frac{101\,325 \text{ Pa} \cdot 1,402}{1,293 \text{ kg/m}^3}} = 331,5 \text{ m/s bei } 0 \text{ °C}$$

Um die Schallgeschwindigkeit c auch für andere Temperaturen T zu berechnen, kann folgende Formel herangezogen werden:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}} \quad (\text{Formel 1.7})$$

Einheit m/s

κ : Adiabatenexponent; für Luft $\kappa = 1,402$

R : Universelle Gaskonstante $R \approx 8,314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$

M : Molare Masse; für Luft $M = 2,87 \cdot 10^{-2} \text{ kg/mol}$

T : Absolute Temperatur in Kelvin; Bezugswert für die Temperatur ist der absolute Nullpunkt bei 0 Kelvin = -273,15 °C; hier sind die Moleküle und Atome bewegungslos.

Die genannten Werte in diese Formel einsetzen und zusammenfassen:

$$c = \sqrt{\frac{1,402 \cdot 8,314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K}) \cdot T}{2,87 \cdot 10^{-2} \text{ kg/mol}}} \quad (\text{Formel 1.8})$$

Einheit m/s

T : Temperatur in Kelvin

Obwohl sich die Schallgeschwindigkeit, wie in Formel 1.8 gesehen, proportional zur Wurzel aus der Temperatur ändert, wird oft eine etwas vereinfachte Formel mit linearem Temperaturfaktor verwendet, die für einen weiten Temperaturbereich hinreichend genaue Werte liefert:

$$c = c_0 + 0,6 \cdot T \quad (\text{Formel 1.9})$$

Einheit m/s

c_0 : Referenzwert = 331,5 m/s (Schallgeschwindigkeit bei 0 °C)

0,6 : Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit ($\pm 1 \text{ °C} \approx \pm 0,6 \text{ m/s}$)

T : Temperatur in Grad Celsius

Bei der durchschnittlichen Raumtemperatur von 20 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit nach dieser Formel 343,5 m/s. Dass bei höherer Temperatur die Ausbreitungsgeschwindigkeit größer ist, liegt darin begründet, dass bei gleichem Druck, also gleicher elastischer Kraft, die Dichte der wärmeren Luft und somit die zu bewegende Masse geringer ist als bei kälterer Luft. Diese Zusammenhänge gelten zunächst für trockene Luft. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich aber auch mit der relativen Luftfeuchtigkeit.

Schallgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit

Mit der Luftfeuchtigkeit ändert sich die Dichte ρ ; es gilt folgender Zusammenhang:

$$\rho = \left(\frac{p_d}{R_d \cdot T} \right) + \left(\frac{p_v}{R_v \cdot T} \right) \quad (\text{Formel 1.10})$$

ρ : Dichte der Luft in kg/m³

p_d : Druck bei 0 % relativer Luftfeuchte (= trockene Luft) in Pa

R_d : Gaskonstante für trockene Luft $R_d \approx 287,05 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

p_v : Druck von Wasserdampf in Pa

R_v : Gaskonstante für vollständig mit Wasserdampf gesättigte Luft $R_v \approx 461,495 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

T : Temperatur in Kelvin

Für beliebige relative Luftfeuchtigkeiten müssen also jeweils die Gaskonstante und der Druck bekannt sein. Und hier fängt es an, wirklich kompliziert zu werden! Als Beispiel sollen daher nur einige berechnete Werte für die Schallgeschwindigkeit c in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit bei 20 °C aufgeführt werden:

c bei 20 % Luftfeuchtigkeit = 343,8 m/s

c bei 50 % Luftfeuchtigkeit = 344,3 m/s

c bei 80 % Luftfeuchtigkeit = 344,5 m/s

Prinzipiell beeinflusst die Luftfeuchtigkeit die Schallgeschwindigkeit also nur gering und ist meist vernachlässigbar, der Einfluss der Temperatur ist wesentlich stärker. Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit wie auch der Luftfeuchtigkeit wird für weitere Berechnungen in diesem Buch dennoch ein mittlerer Wert von $c = 344 \text{ m/s}$ verwendet.

Bisher haben wir nur die Schallgeschwindigkeit in Luft betrachtet. Bei Festkörpern ist die Schallgeschwindigkeit abhängig von den Materialkennwerten des Mediums, durch das sich die Wellen bewegen, wie zum Beispiel der chemischen Zusammensetzung, der Dichte und dem Elastizitätskoeffizienten – darauf soll hier aber nicht näher eingegangen werden. Tab. 1.1 zeigt daher nur einige Beispiele für Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien.

Tab. 1.1: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien.

Material	Schallgeschwindigkeit c
Kautschuk	70 m/s
Luft, 20 °C	344 m/s
Blei	1200 m/s
Wasser, 20 °C	1484 m/s
Eis, -10 °C	3200 m/s
Holz, weich	3340 m/s
Holz, hart	4700 m/s
Glas	5300 m/s
Diamant	18 000 m/s

Laufzeit des Schalls

Die Laufzeit des Schalls lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Laufzeit } t = \frac{\text{Abstand zur Schallquelle } s}{\text{Schallgeschwindigkeit } c} \quad (\text{Formel 1.11})$$

Einheit s

Beispiel: Der Abstand zu einer Schallquelle beträgt 30 m. Wie lange braucht der Schall für diese Distanz?

Lösung:

$$t = \frac{s}{c} = \frac{30 \text{ m}}{344 \text{ m/s}} = 0,087 \text{ s bzw. } 87 \text{ ms}$$

Wettereinflüsse

Nimmt die Lufttemperatur wie bei einer Inversionswetterlage mit der Höhe zu, dann werden die Schallwellen zur Erde zurück gekrümmmt. Dabei kann der Schall sehr weite Distanzen zurücklegen, so dass unter Umständen Ereignisse hörbar werden, die nicht im Sichtfeld liegen. Dies wird als Phänomen der verlängerten Schallausbreitung bezeichnet (Abb. 1.5).

Der gegenteilige Effekt tritt ein, wenn mit der Höhe die Lufttemperatur abnimmt. Hier werden die Schallwellen von der Erde weg gekrümmmt. Auch nahe Schallquellen sind dann im Schallschatten unhörbar (Abb. 1.6).

In Windrichtung wird der Schall zur Erde hin gekrümmmt. Gegen den Wind entsteht dagegen eine Schattenzone, in welcher der Schall vom Boden weg gekrümmmt wird (Abb. 1.7).

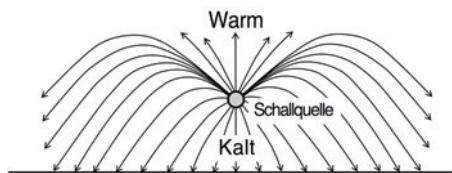


Abb. 1.5: Schallausbreitung bei einer Inversionswetterlage.

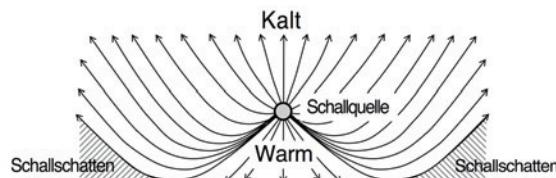


Abb. 1.6: Schallausbreitung bei mit der Höhe abnehmender Temperatur.

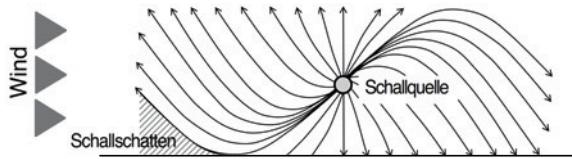


Abb. 1.7: Schallausbreitung bei Wind.

Noch einmal zurück zur Luftfeuchtigkeit. Wie oben gesehen, beeinflusst diese die Schallgeschwindigkeit nur gering, doch sie hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Dämpfung hoher Frequenzen – die so genannte Dissipation. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 20 % und einer Distanz zur Schallquelle von 100 Metern werden Schallanteile mit einer Frequenz (s. Kap. 1.2.1) von 10 kHz um etwa –28 Dezibel (dB, s. Kap. 8) bedämpft, bei 50 % Luftfeuchtigkeit sind es etwa –16 dB und bei 80 % Luftfeuchtigkeit etwa –10 dB. Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit lässt demnach die Dämpfung nach, der Klang wird höhenlastiger.

1.2 Schwingung

Allgemein wird ein Vorgang, der in regelmäßigen Zeitabschnitten immer wieder den gleichen Zustand erreicht, als periodische Schwingung bezeichnet. Ein anschauliches Beispiel dafür lieferte Hermann von Helmholtz (1821–1894) in seiner Veröffentlichung „Die Lehre von den Tonempfindungen“: An einer Stimmgabel befestigte er einen Stift, die Stimmgabel wurde angeschlagen und ein Blatt Papier darunter hergezogen. Die aufgezeichnete Wellenlinie war das direkte Abbild der periodischen Schwingung der Stimmgabel (Abb. 1.8).

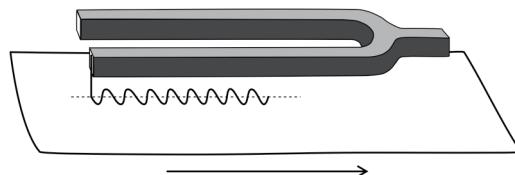


Abb. 1.8: Stimmgabel als Beispiel für eine periodische Schwingung.

1.2.1 Sinusschwingung

Eine periodische Schwingung lässt sich mathematisch aus einer Kreisbewegung ableiten (Abb. 1.9). Ein Punkt auf einer Kreisbahn bewegt sich gegen den Uhrzeigersinn und legt in einer bestimmten Zeit eine bestimmte Strecke zurück. Wird diese Bewegung auf ein Amplituden-Zeit-Diagramm übertragen, dann wird ersichtlich, dass ein Umlauf auf der Kreisbahn einer Periode bzw. der Wellenlänge λ der Schwingung entspricht. Da die Startposition in diesem Fall bei $\varphi = 0^\circ$ liegt, spricht man von einer Sinusschwingung. Liegt die Startposition bei $\varphi = 90^\circ$, handelt es sich um eine Kosinusschwingung. In beiden Fällen entspricht der Radius der Kreisbahn der Amplitude A der Schwingung.

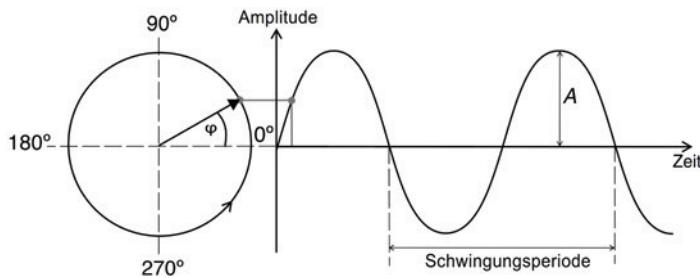


Abb. 1.9: Konstruktion der Sinusschwingung aus einer Kreisbahn.

Amplitude A: Die stärkste Auslenkung der Schwingung. Wird auch Scheitelwert genannt.

Phase φ : Bestimmter, wiederkehrender „Punkt“ im Ablauf einer Schwingung. Wird als Phasenwinkel in Grad ($^{\circ}$) angegeben.

Schwingungsperiode: Eine positive und eine negative Halbwelle einer Sinusschwingung ergeben zusammen eine Schwingungsperiode. Die Zeit, die zum Durchlaufen einer Periode benötigt wird, ist die Periodendauer T ; sie wird in Sekunden angegeben.

Frequenz f

Die Frequenz f gibt die Anzahl der Schwingungsperioden an, die in einer Sekunde durchlaufen werden.

$$\text{Frequenz } f = \frac{1}{\text{Periodendauer } T} \quad (\text{Formel 1.12})$$

Festlegung der Einheit: Die Schwingungen pro Sekunde erhalten die Einheit Hz, zu Ehren von Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894).

$$1 \text{ Hz} = \frac{1 \text{ Schwingung}}{1 \text{ Sekunde}}$$

Frequenz und Tonhöhe

Eine hohe Frequenz entspricht einem hohen Ton, eine niedrige Frequenz einem tiefen Ton. Für uns Menschen relevant ist der hörbare Schall zwischen dem tiefsten Ton mit einer Frequenz von ca. 20 Hz und dem höchsten Ton mit ca. 20 000 Hz (= 20 kHz). Für Menschen unhörbar ist Infraschall unterhalb von 20 Hz, diesen hören zum Beispiel Elefanten oder Wale, und Ultraschall oberhalb von 20 kHz, erzeugt von Hundepfeifen oder durch das „Echolot“ der Fledermäuse.

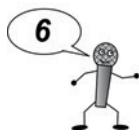
Wellenlänge λ

Berechnung von λ bei der Schallausbreitung in Luft:

$$\text{Wellenlänge } \lambda = \frac{\text{Schallgeschwindigkeit } c}{\text{Frequenz } f} \quad (\text{Formel 1.13})$$

Einheit m

6 Grundlagen der Elektronik



In diesem Kapitel sollen lediglich die Grundlagenkenntnisse zur Elektronik vermittelt werden, soweit diese notwendig sind, um die Zusammenhänge der folgenden Kapitel besser verstehen zu können. Vertiefende Informationen zur Elektronik finden sich im Band „Lichttechnik und Energieversorgung für Veranstaltungstechniker“, ebenfalls erschienen im S. Hirzel Verlag.

6.1 Grundbegriffe

Strom I

Bewegt sich eine gewisse Menge an elektrischen Ladungsträgern Q (Elektronen) in einer definierten Zeitspanne t durch einen Leiter, dann fließt der Strom I :

$$I = \frac{Q}{t} \quad (\text{Formel 6.1})$$

Einheit A

Q : Elektrische Ladung in Coulomb (C)

t : Zeit, in der die Ladungsmenge Q durch den Leiter fließt

Spannung U

Eine elektrische Spannung entsteht durch Ladungstrennung. Die getrennten Ladungen sind bestrebt, sich wieder auszugleichen. Dieses Ausgleichsbestreben wird als elektrische Spannung bezeichnet. Sind der Ohmsche Widerstand R (s. u.) eines Leiters und der Strom I , der durch diesen Leiter fließt bekannt, so lässt sich die Spannung U wie folgt berechnen:

$$U = R \cdot I \quad (\text{Formel 6.2})$$

Einheit V

R : Ohmscher Widerstand in Ω

Elektrische Leistung P und Energie W

Die elektrische Leistung P ist das Produkt aus der Spannung U und dem Strom I , welcher durch einen Leiter fließt:

$$P = U \cdot I \quad (\text{Formel 6.3})$$

Einheit W

Alternative Berechnungsmöglichkeiten für die elektrische Leistung:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (\text{Formel 6.4})$$

$$P = I^2 \cdot R \quad (\text{Formel 6.5})$$

Wirkt eine elektrische Leistung P über eine gewisse Zeit t , so wird die elektrische Energie W umgesetzt:

$$W = P \cdot t \quad (\text{Formel 6.6})$$

Einheiten: Wattsekunden (Ws) oder Kilowattstunden (kWh)

Gleichstrom und Gleichspannung (=)

In einem Gleichstromkreis ist die Polarität der Spannungsquelle festgelegt, es gibt damit einen Plus- und einen Minuspol. Gleichstromquellen sind beispielsweise Akkumulatoren und Batterien (s. Kap. 7). Strom und Spannung sind beim Gleichstrom über die Zeit konstant (Abb. 6.1).

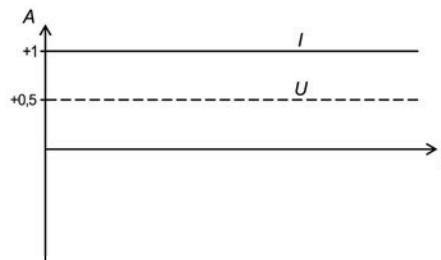


Abb. 6.1: Strom I und Spannung U bei Gleichstrom (Beispiel).

Stromrichtung im Leiter

- Technischer Stromfluss: Vom Plus- zum Minuspol (angenommener Stromfluss in elektronischen Schaltungen).
- Physikalisch: Die Elektronen bewegen sich vom Minus- zum Pluspol (tatsächlicher Stromfluss).

Wechselstrom und Wechselspannung (\sim)

Beim Wechselstrom bzw. der Wechselspannung ändern sich der Strom i und die Spannung u periodisch mit der Zeit (Abb. 6.2; zur besseren Unterscheidung zum Gleichstrom werden die Formelzeichen i und u klein geschrieben.). Typische Wechselstromquellen sind Generatoren, aber auch Niederfrequenz- und Hochfrequenzsignale in der Audio- und Nachrichtentechnik sind Wechselströme. Wechselstrom kann durch Transformatoren auf andere Spannungen transformiert und durch Gleichrichterschaltungen in Gleichstrom gewandelt werden (s. Kap. 6.3.2).

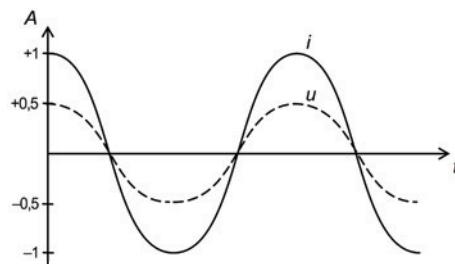


Abb. 6.2: Strom i und Spannung u bei Wechselstrom (Beispiel).

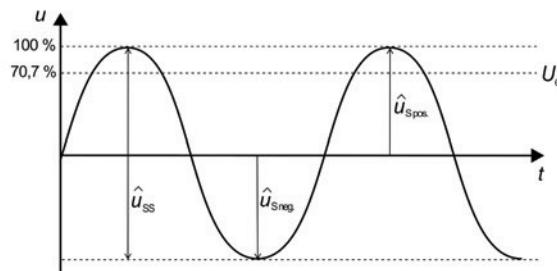


Abb. 6.3: Spitzenwerte und Effektivwert einer Wechselspannung.

Bei einer Wechselspannung gibt es folgende Spitzenwerte im Schwingungsverlauf (Abb. 6.3):

- Die Spitze-Spitze-Spannung \hat{u}_{SS} liegt zwischen dem positiven und dem negativen Spitzenwert einer Periodendauer.
- Die Spitze-Spannung \hat{u}_S ist das positive oder das negative Maximum einer Halbwelle.

Daraus lässt sich der Effektivwert U_{eff} ableiten; er ist der quadratische Mittelwert, der einem Gleichstrom bzw. einer Gleichspannung entspricht (daher die Großschreibung des Formelzeichens), die an einem Ohmschen Widerstand in der gleichen Zeit die gleiche Energie umsetzen. Die englische Bezeichnung hierfür lautet Root Mean Square (RMS). Berechnung:

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{u}_S}{\sqrt{2}} \quad (\text{Formel 6.7})$$

Crest-Faktor C

Der Crest-Faktor ist das Verhältnis zwischen dem Spitzenwert und dem Effektivwert einer Wechselspannung:

$$C = \frac{\hat{u}_S}{U_{\text{eff}}} \quad (\text{Formel 6.8})$$

Der Crest-Faktor einer Sinusschwingung ist konstant und beträgt:

$$C = \sqrt{2} = 1,414 \quad (\text{Formel 6.9})$$

Der Crest-Faktor nimmt bei nicht sinusförmigen Signalen andere Werte an und ist zum Beispiel bei der Komprimierung von Audiosignalen von Interesse (s. Kap. 16.1.2).

Leistung bei Wechselstrom $P_{(t)}$

Da sich Strom und Spannung beim Wechselstrom mit der Zeit ändern, ist auch die elektrische Leistung eine zeitabhängige Größe:

$$P_{(t)} = u_{(t)} \cdot i_{(t)} \quad (\text{Formel 6.10})$$

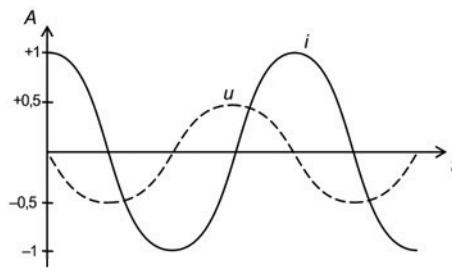


Abb. 6.4: Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ($\varphi = 90^\circ$).

Durch Induktivitäten oder Kapazitäten (s. u.) in einem Wechselstromkreis entsteht eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung (Abb. 6.4). Diese Phasenverschiebung führt dazu, dass es bei Wechselstrom mehrere Leistungsdefinitionen gibt, nämlich die Wirk-, die Blind- und die Scheinleistung.

Wirkleistung P

Die Wirkleistung gibt die für einen elektrischen Verbraucher effektiv nutzbare Energie an. Berechnung:

$$P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi \quad (\text{Formel 6.11})$$

Einheit W

Die Wirkleistung ist dann am größten, wenn Strom und Spannung mit $\varphi = 0^\circ$ in Phase sind. (Der Kosinus von 0° ist gleich 1.) Bei einer Phasendifferenz von $\varphi = 90^\circ$ verschwindet die Wirkleistung. (Der Kosinus von 90° ist gleich 0.)

Blindleistung Q

Die Blindleistung ist praktisch nicht nutzbar, da sie vom elektrischen Verbraucher zwar aufgenommen, aber sofort wieder an die Quelle zurückgegeben wird. Berechnung der Blindleistung:

$$Q = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin \varphi \quad (\text{Formel 6.12})$$

Einheit var

Bei einer Phasenverschiebung von 90° ist die Blindleistung maximal. (Der Sinus von 90° ist gleich 1.) Bei 0° Phasendifferenz gibt es dagegen keine Blindleistung, sondern nur Wirkleistung. (Der Sinus von 0° ist gleich 0.)

Scheinleistung S

Die Scheinleistung S lässt sich aus der Wirkleistung P und der Blindleistung Q ableiten:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{Formel 6.13})$$

Oder auch aus den Effektivwerten der Spannung und des Stroms:

$$S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \quad (\text{Formel 6.14})$$

Einheit VA

Widerstand R

Fließen Elektronen durch einen elektrischen Leiter, so verlieren sie Energie, da sie mit den Atomen des Leiters zusammenstoßen – der Leiter setzt den Elektronen einen Widerstand entgegen. Bei diesem Vorgang wird Wärme freigesetzt.

Definition des Widerstandes R (Ohmsches Gesetz)

$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{Formel 6.15})$$

Die Einheit ist das Ohm (Ω):

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

Leitwert G

Der Leitwert G ist der Kehrwert des Widerstandes R :

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{Formel 6.16})$$

Die Einheit ist das Siemens (S):

$$1 \text{ S} = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V}}$$

Wenn ein Material Strom gut leitet, hat es einen hohen Leitwert und einen geringen Widerstand. Leitet ein Material schlechter, dann hat es einen hohen Widerstand und einen geringen Leitwert.

Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

Widerstände (Abb. 6.5) können in Reihe oder auch parallel geschaltet werden. Der Gesamtwiderstand R_{Ges} einer Schaltung kann entsprechend den folgenden Formeln berechnet werden.

Reihenschaltung:

$$R_{\text{Ges}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (\text{Formel 6.17})$$

Parallelschaltung:

$$\frac{1}{R_{\text{Ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (\text{Formel 6.18})$$

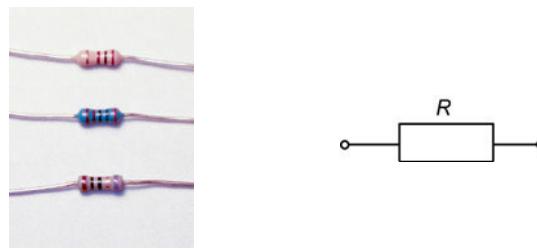


Abb. 6.5: Verschiedene elektrische Widerstände und Schaltsymbol.

Spezifischer Widerstand ρ

Jedes Leitermaterial hat einen spezifischen Widerstand ρ . Die Einheit ist $[\Omega \cdot \text{m}]$, allerdings wird oft auch der Leiterquerschnitt in mm^2 berücksichtigt:

$$\text{Spezifischer Widerstand } \rho = \frac{\text{Ohmscher Widerstand } R \text{ in } \Omega \cdot \text{Leiterquerschnitt } A \text{ in } \text{mm}^2}{\text{Länge des Leiters in m}}$$

Bei dem am häufigsten eingesetzten Leitermaterial Kupfer beträgt $\rho = 0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Für die meisten leitenden Materialien gilt, dass sich der spezifische Widerstand mit steigender Temperatur erhöht. Dieser Zusammenhang wird durch den Temperaturkoeffizienten α ausgedrückt. Bei Kupfer beträgt der Temperaturkoeffizient $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$ ($\text{K} = \text{Kelvin}$), das bedeutet, bei einer Temperaturänderung von 100 K ändert sich der spezifische Widerstand um 40 %.

Impedanz Z

Der Begriff der Impedanz taucht in diesem Buch an verschiedenen Stellen auf: Zunächst in Kap. 2 als *Schallkennimpedanz*, und in diesem Kapitel folgt nun die allgemeine Definition der *elektrischen Impedanz*. Bei der Anpassung spielt sie eine Rolle, ebenso bei Hochfrequenzkabeln (Kap. 11) und in der Antennentechnik (Kap. 12). Schließlich wird noch die Nennimpedanz von Mikrofonen und Lautsprechern angesprochen (Kap. 9 und 18).

„Impedanz“ leitet sich aus dem lateinischen Wort „impedire“ ab, was so viel wie Hemmen oder auch Verhindern bedeutet. So sagt ein bestimmter Wert der Schallkennimpedanz aus, dass ein Medium Schall besser oder schlechter überträgt. Bei der elektrischen Impedanz spielt die Strom-, Spannungs- oder Leistungübertragung über ein Kabel oder eine Leitung eine Rolle. Letztlich wird betrachtet, in welcher Quantität (Amplitude) und Qualität (Frequenzgang) ein gesendetes Signal beim Empfänger ankommt.

Sind der Strom und die Spannung bei einem sinusförmigen Signal mit $\varphi = 0^\circ$ in Phase, so kann die elektrische Impedanz Z aus dem Quotienten des Effektivwerts der Spannung U_{eff} und dem Effektivwert des Stroms I_{eff} berechnet werden:

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} \quad (\text{Formel 6.19})$$

Einheit Ω

Audiosignale sind in der Praxis eher nicht sinusförmig, außer vielleicht spezielle Testsignale (s. Kap. 19.4.1), die Frequenz ändert sich also stetig und damit auch die Phasendifferenz. Demnach ist hier die Impedanz eine komplexe Größe. Wie wir noch sehen werden, haben Induktivitäten und Kapazitäten einen Einfluss auf die Phase und damit auf die Impedanz und deren Verlauf über das Frequenzspektrum.

Die Impedanz hat eine große Bedeutung bei der elektrischen Anpassung von Hochfrequenzleitungen, aber auch bei der Wellenausbreitung im freien Raum, also bei elektromagnetischen Wellen. Stimmen bei der HF-Übertragung die Impedanzwerte von Sender, Antenne, Kabelstrecke und Empfänger nicht überein, wird an den Übergängen ein Teil der Energie reflektiert. Das gleiche gilt übrigens auch für den Schall, denn ein Teil der Schallenergie wird beim Übergang von einem Medium mit geringer Schallkennimpedanz in ein Medium mit hoher Schallkennimpedanz reflektiert. Durch die Reflexionen kommt es zu Interferenzen und damit zu einem unregelmäßigen Frequenzgang aufgrund von Auslöschungen oder Überhöhungen einzelner Frequenzen.

Induktivität L

Neben dem schon erwähnten Ohmschen Widerstand werden in elektronischen Schaltungen auch Induktivitäten verwendet. Eine typische Anwendung sind zum Beispiel passive Filterschaltungen (s. Kap. 6.2) bzw. Frequenzweichen (s. Kap. 17.1). In einer Induktivität wird die zugeführte elektrische Energie über ein magnetisches Feld zeitlich begrenzt gespeichert. Das typische induktive Bauteil ist die Spule. Diese kann sehr klein gewickelt und in Kunstharz eingegossen sein, so dass sie äußerlich nicht mehr als Spule erkennbar ist (Abb. 6.6).

Definition der induktiven Einheit Henry (H): Eine Spule hat eine Induktivität von 1 H, wenn bei einer gleichförmigen Stromänderung von einem Ampere in einer Sekunde eine Induktionsspannung von einem Volt entsteht.

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{1 \text{ A}}$$

Verhalten der Induktivität bei Wechselstrom

Die Impedanz Z erhöht sich mit steigender Frequenz f .

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi \cdot f \cdot L)^2} \quad (\text{Formel 6.20})$$

Z : Impedanz in Ω

R : Ohmscher Widerstand in Ω

f : Frequenz in Hz

L : Induktivität in H

Das bedeutet, dass hohe Frequenzen durch eine Induktivität gedämpft werden, tiefe Frequenzen aber ungehindert passieren können.

9 Mikrofone



Die theoretischen Grundlagen der Mikrofontechnik sind ein Thema im ersten Lehrjahr. Spätestens im zweiten Lehrjahr ist dann der praktische Einsatz von Mikrofonen vorgesehen (in der Regel wird das sicherlich schon vorher geschehen).

9.1 Mikrofon-Wandlerprinzipien

Mikrofone wandeln die Schallschwingungen der Luft in eine elektrische Wechselspannung um. Es gibt verschiedene Prinzipien, wie dies erfolgen kann.

Mikrofon-Wandlerprinzip = Wie wird die Schwingung der Luftteilchen in eine elektrische Schwingung umgewandelt? (Bei Lautsprecher-Wandlerprinzipien gilt das Umgekehrte.)

9.1.1 Kohlemikrofon

Das Kohlemikrofon ist eines der ältesten Wandlerprinzipien – es wurde bereits in den 1870er Jahren entwickelt. Erst im Jahre 1917 wurden Kondensatormikrofone gebaut, ab 1920 brauchbare dynamische Tauchspulenmikrofone, und ab den 1930er Jahren gab es dann auch Bändchenmikrofone. Kohlemikrofone spielen in der professionellen Audiotechnik inzwischen eigentlich keine Rolle mehr, dennoch werden sie von einigen Herstellern noch gebaut und für Spezialanwendungen eingesetzt (Abb. 9.1).

Die Kapsel eines Kohlemikrofons steht unter Gleichspannung. Wird die Membran durch Schall in Schwingung versetzt, werden die Kohlekörper in der Kapsel mehr oder weniger fest aneinander gedrückt, wodurch sich der Innenwiderstand der Kapsel ändert. Analog zu den Widerstandsänderungen wird damit dem Gleichstrom ein Sprechwechselstrom überlagert. Ein Übertrager (s. Kap. 7.2) am Ausgang trennt schließlich Gleichspannung und Wechselspannung (Abb. 9.2).

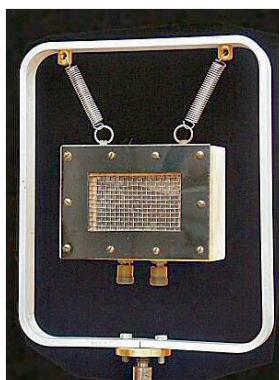


Abb. 9.1 Links: Historisches Kohlemikrofon (Reisz Marmorblockmikrofon). **Rechts:** Aktuelles Kohlemikrofon (Shure 104C).

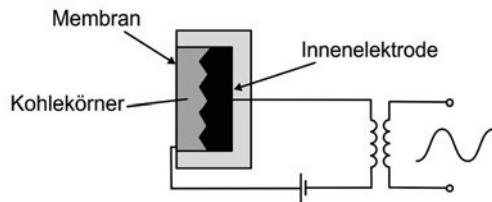


Abb. 9.2: Prinzip eines Kohlemikrofons.

Proportionalität der Ausgangsspannung ΔU zum Ohmschen Widerstand ΔR der Kapsel:

$$\Delta U \sim \Delta R \quad (\text{Formel 9.1})$$

Diese Proportionalität gilt allerdings nicht für den ganzen Frequenzbereich. Zudem erzeugen die Körner des Kohlegranulats bei der Verschiebung kleine Pegelspitzen im Ausgangssignal. Deswegen haben Kohlemikrofone einen sehr hohen Klirrfaktor (s. Kap. 6.3.5) von ca. 10 bis 40 %. Ein weiterer Nachteil ist das prägnante Eigenrauschen. Allerdings ist der prinzipielle Aufbau und damit die Herstellung eines Kohlemikrofons sehr einfach und damit kostengünstig.

9.1.2 Dynamische Mikrofone

Die Funktionsweise eines dynamischen Mikrofons beruht auf dem Induktionsgesetz: In einem elektrischen Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, wird eine Spannung induziert. Dieser Sachverhalt wird auch elektrodynamisches Prinzip genannt. Der bewegte Leiter kann die Mikrofonmembran selber sein (wie beim Bändchenmikrofon), oder aber eine Schwingungsspule, welche an einer Membran befestigt ist (wie beim Tauchspulenmikrofon).

Bändchenmikrofon

Das Bändchen im Magnetfeld ist nur einige Zentimeter lang und wenige Millimeter breit (Abb. 9.3). Als relativ kurzer elektrischer Leiter gibt das Bändchen eine sehr geringe Spannung ab. Daher ist ein Ausgangsübertrager notwendig, der die Spannung auf Mikrofonpegel heraufformiert und gleichzeitig die Impedanz (s. Kap. 6.1) auf die für Mikrofone üblichen 200Ω wandelt (Abb. 9.4).



Abb. 9.3: Bändchen eines historischen Bändchenmikrofons (Siemens & Halske).

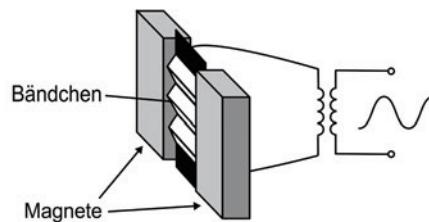


Abb. 9.4: Prinzip eines Bändchenmikrofons.

Ableitung der Ausgangsspannung bei dynamischen Mikrofonen:

$$u_i = B \cdot l \cdot v \cdot z \quad (\text{Formel 9.2})$$

u_i : Induzierte Wechselspannung in V

B : Magnetische Flussdichte in T

l : Länge des Bändchens in m

v : Geschwindigkeit des bewegten Bändchens in m/s

z : Anzahl der Leiter im Magnetfeld; beim Bändchen gilt $z = 1$

Bändchenmikrofone besitzen allgemein einen sehr linearen Frequenzgang, daneben sorgt die leichte Membran für ein gutes Impulsverhalten. Allerdings reagiert das Bändchen empfindlich auf Wind, Erschütterungen und schnelle Bewegungen.

Tauchspulenmikrofon

Eine Spule ist aufgrund der vielen Wicklungen im Vergleich zu einem Bändchen ein sehr viel längerer Leiter. Und je länger der Leiter in einem Magnetfeld ist bzw. je mehr Windungen die Spule hat, desto größer ist die induzierte Wechselspannung u_i . Die Schwingspule eines Tauchspulenmikrofons ist an eine Kunststoffmembran geklebt und kann sich frei im Magnetfeld eines Permanentmagneten bewegen (Abb. 9.5). Im Vergleich zu einem Bändchen- oder Kondensatormikrofon ist der Frequenzgang eines Tauchspulenmikrofons nicht besonders linear. Auch das Impulsverhalten ist nicht so gut, und es zeigt sich ein erheblich längeres Nachschwingen aufgrund der größeren Masse des Membransystems und der Nachgiebigkeit der Aufhängung (Abb. 9.6). Im Gegensatz zum Bändchenmikrofon wird aber kein Übertrager für die richtige Ausgangsimpedanz benötigt.

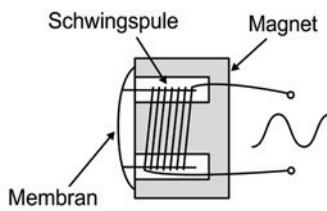


Abb. 9.5: Prinzip eines Tauchspulenmikrofons und Kapsel eines Shure SM57.

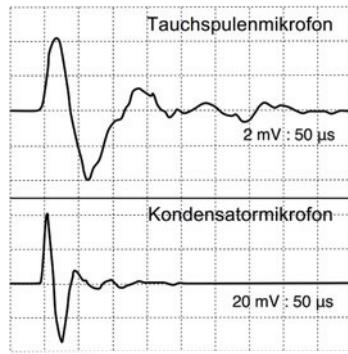


Abb. 9.6: Impulsverhalten von Tauchspulen- und Kondensatormikrofonen.

Aufwendig sind beim Tauchspulenmikrofon die Maßnahmen, den Frequenzgang im gesamten Übertragungsbereich einigermaßen linear zu halten. Dazu muss der Einfluss der Membranmasse auf das Übertragungsverhalten durch zusätzliche Resonanzräume im Mikrofonegehäuse kompensiert werden. Die Schwingspule ist anfällig für elektromagnetische Störfelder, wie sie zum Beispiel von Lichtdimmern verursacht werden. Zur Brummkompensation kann eine zweite unbewegte Spule in der Kapsel eingebaut sein, deren Ausgangssignal in der Phase gedreht ist. Störgeräusche löschen sich dann beim Zusammenmischen der Signale der bewegten und der unbewegten Spule durch destruktive Interferenz aus.

Trotz aller messtechnischen Nachteile sind auf der Bühne fast ausschließlich Tauchspulenmikrofone im Einsatz – sie sind robust und arbeiten auch bei extrem hohen Schalldruckpegeln ohne Verzerrungen.

9.1.3 Kondensatormikrofon

Die Membran ist hier die Platte eines Kondensators (s. Kap. 6.1). Ändert sich durch die Schwingung der Membran der Abstand zur GegenElektrode, so ändert sich proportional die Kapazität des Kondensators (elektrostatisches Prinzip). Man unterscheidet Kondensatormikrofone in Niederfrequenz- und Hochfrequenzschaltung.

Niederfrequenzschaltung

Kondensatormikrofone werden heutzutage hauptsächlich in Niederfrequenzschaltung hergestellt, die im Prinzip so aussieht wie in Abb. 9.7 gezeigt. Eine Änderung der Kapazität ΔC ruft hier an einem parallel geschalteten Widerstand eine Spannungsänderung ΔU hervor:

$$\Delta U = \frac{Q}{\Delta C} \quad (\text{Formel 9.3})$$

mit:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (\text{Formel 9.4})$$

Q : Elektrische Ladung (Kapselvorspannung) in C

ϵ_0 : Dielektrizitätskonstante ($= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)

ϵ_r : Permittivitätszahl ($= 1$ in Luft bei 20°C)

C : Kapazität in F

A : Plattenfläche in m^2

d : Plattenabstand in m

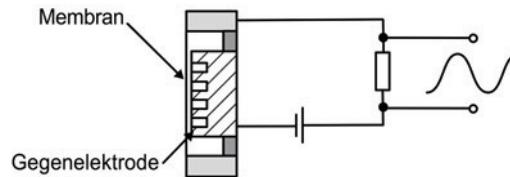


Abb. 9.7: Kondensatormikrofon in Niederfrequenzschaltung.

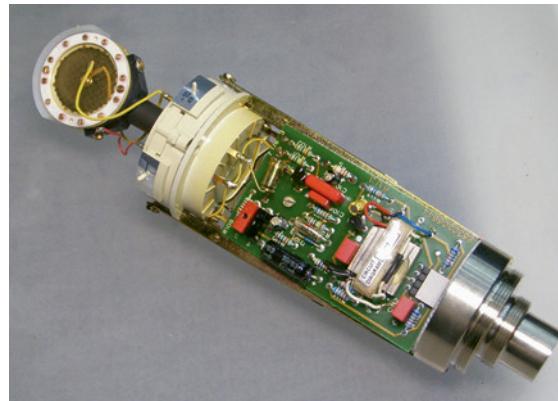


Abb. 9.8: Kondensatormikrofon (Neumann U87).

Die derart erzeugte Spannung kann jedoch nicht auf eine Mikrofonleitung gegeben werden, da der Ausgangswiderstand dieser Schaltung viel zu hoch ist. Ein in das Mikrofonegehäuse integrierter Trennverstärker sorgt für die notwendige Impedanzwandlung (s. Kap. 11.1). In Abb. 9.8 sieht man die Elektronik eines geöffneten Kondensatormikrofons.

Hochfrequenzschaltung

Als die Halbleitertechnik noch nicht so weit fortgeschritten war, bzw. es noch keine rauscharmen Feldeffekttransistoren (s. Kap. 6.3.3) gab, wurden Kondensatormikrofone mit normalen, bipolaren Transistoren in Hochfrequenzschaltungen gebaut. Dabei steuert die Mikrofonmembran die Frequenz oder die Phase eines Hochfrequenz-Oszillators (Modulation: s. Kap. 6.5). Eine zusätzliche Demodulatorschaltung liefert dann erst das Audiosignal am Mikrofonausgang.

Der Anwender kann von außen nicht erkennen, ob ein Kondensatormikrofon in Niederfrequenz- oder Hochfrequenztechnik gebaut ist.

Phantomspeisung

Ein Kondensatormikrofon benötigt eine Versorgungsspannung, für die Kapselvorspannung und zum Betrieb des Trennverstärkers. Diese Spannung kann über eine eingebaute Batterie oder über eine separate Leitung zugeführt werden, allerdings ist beides wenig praktikabel. Sind Mikrofonleitungen symmetrisch ausgeführt (s. Kap. 11.2.3), so bietet sich die Möglichkeit, über diese Leitung gleichzeitig das Mikrofon mit einer Gleichspannung zu versorgen. Die heute gebräuchliche Speiseart ist daher die Phantomspeisung P48 mit einer Spannung von +48 V auf beiden Adern bezogen auf die Masse (Abb. 9.9). Das Wechselstrom-Audiosignal wird durch die Phantomspeisung nicht beeinträchtigt.

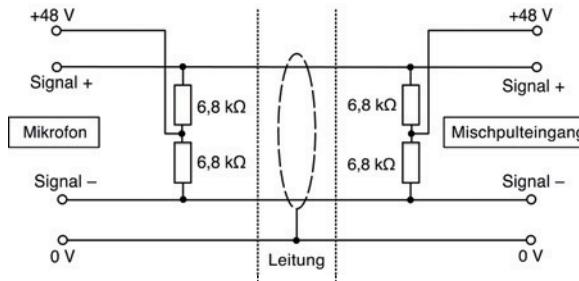


Abb. 9.9: Phantomspeisung P48 mit 6,8 kΩ-Speisewiderständen.

Die beiden Widerstände der Phantomspeiseschaltung in den Mikrofonen und in den Mikrofonverstärkern haben einen genormten Wert von jeweils 6,8 kΩ mit einer sehr engen Toleranz von max. 0,4 %. Der Versorgungsstrom beträgt max. 10 mA, die Versorgungsspannung von 48 V darf um maximal ± 4 V schwanken. Eine weitere, aber nicht so weit verbreitete Variante ist die Phantomspeisung über die Mittenanzapfung eines Übertragers, wobei hierbei sehr hohe Anforderungen an dieses Bauteil gestellt werden: Sowohl die Impedanz als auch der Ohmsche Widerstand der beiden Wicklungen müssen gleiche Werte aufweisen, da es ansonsten aufgrund unterschiedlicher Teilströme zu einer Gleichstrommagnetisierung des Trafokerns kommt.

Kondensatormikrofon in Elektretbauweise

Durch spezielle Verfahren und geeignete Materialien ist es möglich, die Mikrofonmembran dauerhaft zu polarisieren. Damit kann auf eine externe Vorspannung verzichtet werden. Es ist nur eine Batterie mit niedriger Gleichspannung notwendig, um den Trennverstärker mehrere hundert Stunden lang zu betreiben. Elektretmikrofone sind somit eine Alternative, wenn keine Phantomspeisung zur Verfügung steht, also bei mobilen Anwendungen. (Gleichwohl kann die Phantomspeisung aber dennoch zum Betrieb des internen Verstärkers eingeschaltet werden.) Elektretmikrofone werden industriell in hohen Stückzahlen hergestellt, denn in fast jedem Mobiltelefon ist eines eingebaut.

9.1.4 Piezoelektrischer Wandler

Piezoelektrische Wandler nutzen die Eigenschaft bestimmter Kristalle, auf mechanischen Druck mit einer elektrischen Ladungsverschiebung zu reagieren. Die Ladung und damit auch die Ausgangsspannung ist dabei proportional zu der Kraft, die auf die Piezofläche wirkt:

$$\Delta U \sim \Delta Q \sim \frac{\Delta F}{A} \quad (\text{Formel 9.5})$$

ΔU : Änderung der Spannung in V

ΔQ : Änderung der elektrischen Ladung in C

ΔF : Änderung der Kraft in N

A : Fläche des Piezowandlers in m²

Ein Nachteil von Piezowandlern ist die Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit und des Frequenzgangs. Die Anwendung bleibt daher meist auf spezielle Aufgaben beschränkt, zum Beispiel als Tonabnehmer bei Akustikgitarren und Kontrabässen (Abb. 9.10 Links). Es werden auch sehr preiswerte Mikrofone in Piezotechnik gebaut; diese haben allerdings oft schlechte

Übertragungseigenschaften. Sie kommen in der professionellen Audiotechnik daher lediglich als Triggermikrofone (Abb. 9.10 Rechts) zur Ansteuerung von MIDI-Klangerzeugern zum Einsatz (MIDI: s. Kap. 14).



Abb. 9.10 Links: Piezotonabnehmer unter dem Steg eines Kontrabasses. **Rechts:** Triggermikrofon an einer Snaredrum.

9.2 Empfängerprinzipien und Richtcharakteristiken

Die Membran eines Mikrofons kann je nach Ausführung der Kapsel auf verschiedene Schallkenngrößen reagieren. Man spricht hier auch vom Empfängerprinzip.

Empfängerprinzip = Auf welche Schallkenngröße reagiert das Mikrofon?

Jedem Empfängerprinzip kann eine Richtcharakteristik zugeordnet werden (Abb. 9.11 und Tab. 9.1), d. h., Mikrofone sind für Schall aus verschiedenen Richtungen unterschiedlich empfindlich. Zur Veranschaulichung wird die Richtcharakteristik zweidimensional in einem Polardiagramm dargestellt. In Wirklichkeit muss man sich die Darstellung dreidimensional und rotationssymmetrisch vorstellen. Die Änderung der Empfindlichkeit des Mikrofons für einfallenden Schall ist bezogen auf die Einsprechrichtung bei 0° .

Tab. 9.1: Empfängerprinzipien und deren Richtwirkung.

Empfängerprinzip	Richtwirkung	Richtcharakteristik
Druckempfänger	Ungerichtet	Kugel
Druckgradientenempfänger	Gerichtet	Acht und Niere
Interferenzempfänger	Gerichtet	Keule

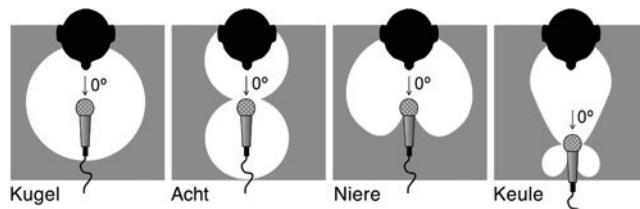


Abb. 9.11: Richtcharakteristiken.

9.2.1 Druckempfänger

Bei einem Druckempfänger ist nur eine Seite der Membran dem Schallfeld ausgesetzt. Die Rückseite ist dicht abgeschlossen. Zum Ausgleich des Atmosphärendrucks hat die Mikrofonkapsel eine kleine Kapillarbohrung. Die Membran spricht auf alle Schalldruckänderungen an, egal aus welcher Richtung die Schallwellen eintreffen. Ein Druckempfänger besitzt daher keine Richtwirkung und hat eine kugelförmige Richtcharakteristik (Abb. 9.12).

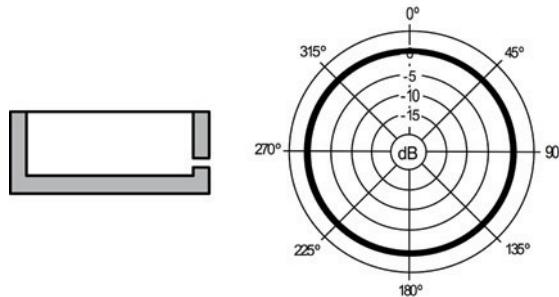


Abb. 9.12: Druckempfänger.

Diese Kugelcharakteristik erfährt allerdings durch drei Phänomene eine Abweichung von ihrer idealen Form und nähert sich mit zunehmender Frequenz einer Nierencharakteristik:

1. Abschattung (s. Kap. 3.1.3). Der rückwärtige oder von der Seite auf die Membran treffende Schall wird nur dann um die Mikrofonkapsel gebeugt, wenn die Wellenlänge groß im Verhältnis zur Kapselgröße ist. Umgekehrt bedeutet dies, dass Wellen hoher Frequenzen abgeschattet werden. Schall direkt von vorne trifft dagegen immer ungehindert auf die Membran, unabhängig von der Wellenlänge.
2. Druckstau (s. Kap. 3.1.1). Trifft Schall frontal auf die Mikrofonkapsel, so kommt es zum Druckstau für Wellenlängen, die kleiner sind als der Membrandurchmesser. Der einfallende und der reflektierte Schall hoher Frequenz überlagern sich gleichphasig. Vor der Membran eines Druckempfängers kommt es daher zu einer natürlichen Höhenanhebung von +6 dB.
3. Interferenzen (s. Kap. 1.2.2) unabhängig vom Druckstau. Schräg ankommende Schallwellen treffen nicht gleichzeitig, sondern mit unterschiedlichen Phasenlagen auf die Membran. Dadurch resultiert eine Aufhebung der Membranauslenkung durch Phasenauslösungen.

Freifeld- und Diffusfeldentzerrung

Wenn Druckempfänger nahe einer Schallquelle im Direktschall, also im Freifeld positioniert werden sollen, können Mikrofone mit Freifeldentzerrung zur Anwendung kommen. Das bedeutet, dass hier die Höhenanhebung aufgrund des Druckstau-Effekts durch akustische oder elektronische Filter ausgeglichen wird. Druckempfänger ohne entsprechende Vorrichtungen heißen diffusfeldentzerrte Mikrofone und werden demnach in einiger Entfernung zur Schallquelle aufgestellt. Gegen diese „Regel“ kann allerdings auch bewusst verstößen werden, und so werden manchmal diffusfeldentzerrte Mikrofone im Nahbereich einer Schallquelle eingesetzt. Die sich ergebende Höhenanhebung wird dann als Mittel der Klanggestaltung genutzt (Freifeld und Diffusfeld: s. Kap. 3.3).

9.2.2 Druckgradientenempfänger

Druckgradientenempfänger werden manchmal auch nicht ganz korrekt als Druckdifferenzempfänger bezeichnet, auch wenn dies deren Funktionsprinzip eigentlich gut beschreibt. Die Membran ist dem Schallwellenfeld mit beiden Seiten ausgesetzt, und das Druckgefälle zwischen Vorder- und Rückseite lenkt die Membran aus. Die Richtcharakteristik eines idealen Druckgradientenempfängers hat die Form einer Acht (Abb. 9.13).

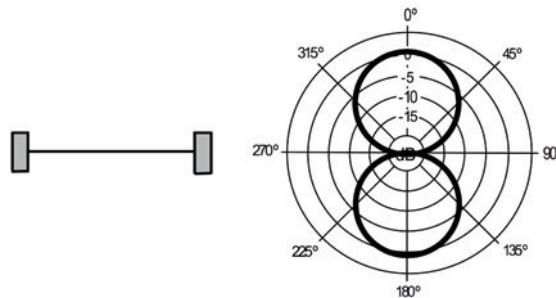


Abb. 9.13: Druckgradientenempfänger.

Durch akustische Laufzeitglieder, also zusätzliche Umwege für den Schall innerhalb des Mikrofons, lässt sich die Richtwirkung einer Niere konstruieren (Abb. 9.14).

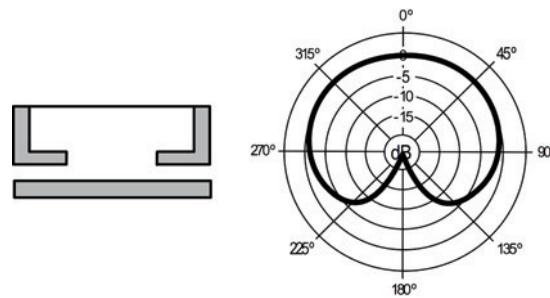


Abb. 9.14: Druckgradientenempfänger mit Laufzeitglied

Frequenzabhängigkeit der Membranauslenkung

Die Membran eines Druckgradientenempfängers wird dann maximal ausgelenkt, wenn die Distanz zwischen Membranvorderseite und -rückseite eine halbe Wellenlänge beträgt bzw. die Phasendifferenz 180° ist. Die Druckdifferenz Δp ist dann am größten (Abb. 9.15).

Ist die Wegstrecke für den Schall dagegen in der Größenordnung von genau einer Wellenlänge, ist die Phasen- und Druckdifferenz gleich Null. Die Membran wird bei einer Frequenz mit dieser Wellenlänge also nicht ausgelenkt.

Um eine Membranauslenkung zu erhalten, die von der tiefsten bis zur höchsten zu übertragenden Frequenz stetig zunimmt, wird die mittlere Wegstrecke durch die Konstruktion der Mikrofonkapsel so festgelegt, dass sie etwa der halben Wellenlänge der höchsten zu übertragenden Frequenz entspricht.

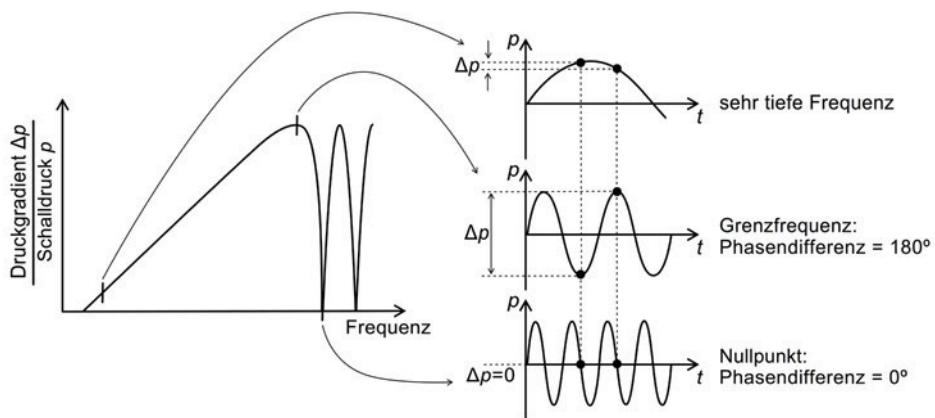


Abb. 9.15: Druckgradient bei verschiedenen Frequenzen.

Die obere Grenzfrequenz von Druckgradienten liegt in der Praxis zwischen 8 und 16 kHz. Da eben dieser Frequenzbereich nicht mehr so gut übertragen werden kann, bauen viele Hersteller den so genannten „Survival Boost“ ein, wie es Jörg Wuttke (Schoeps Mikrofone) genannt hat. Es werden also akustische oder elektronische Filter eingesetzt, die den Frequenzgang (s. Kap. 9.3) im Bereich der Grenzfrequenz anheben. Aufgrund dieses Sachverhaltes haben viele Druckgradienten eine charakteristische Anhebung bei ca. 10 kHz.

Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik

Durch Abschattung und Interferenzen, wie sie schon für den Druckempfänger beschrieben wurden, tendiert die Richtcharakteristik einer Niere zu hohen Frequenzen hin mehr zu einer Acht, zu tiefen Frequenzen zu einer Kugel. Der Druckstau spielt bei Druckgradientenempfängern keine Rolle.

Nahbesprechungeffekt bei Druckgradientenempfängern

Befindet sich ein Druckgradientenempfänger in einem geringen Abstand zu einer Schallquelle (weniger als 30 bis 40 cm), werden die tiefen Frequenzanteile des Schalls mit einem größerem Pegel erfasst. Diese Erscheinung heißt Nahbesprechungeffekt. (Wie dieser Effekt zustande kommt, wird etwas ausführlicher am Ende dieses Kapitels in einem grauen Kasten erklärt.) Für ein Nierenmikrofon lässt sich die Anhebung der tiefen Frequenzen im Vergleich zu einem Mikrofon mit Kugelcharakteristik mit folgender Formel berechnen:

$$\frac{U_{\text{Niere}}}{U_{\text{Kugel}}} = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{16\pi^2 \cdot r^2}} \quad (\text{Formel 9.6})$$

U_{Niere} : Ausgangsspannung des Nierenmikrofons bei 0° Einsprechrichtung in V

U_{Kugel} : Ausgangsspannung des Kugelmikrofons bei 0° Einsprechrichtung in V

r : Abstand von einer Punktschallquelle in m

λ : Wellenlänge in m

Als Ergebnis erhält man ein Spannungsverhältnis, welches in einen relativen Spannungspegel umgerechnet werden kann (s. Kap. 8.2). Eine ähnliche Berechnung lässt sich auch für Mikrofone mit Achtercharakteristik durchführen; dabei zeigt sich, dass der Nahbesprechungeffekt im Vergleich zur Niere ungefähr eine Oktave höher einsetzt (Abb. 9.16).

$$\frac{U_{\text{Acht}}}{U_{\text{Kugel}}} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{\lambda}{2\pi \cdot r} = \frac{54,14}{f \cdot r} \quad (\text{Formel 9.7})$$

U_{Acht} : Ausgangsspannung des Achtermikrofons bei 0° Einsprechrichtung in V

U_{Kugel} : Ausgangsspannung des Kugelmikrofons bei 0° Einsprechrichtung in V

r : Abstand von einer Punktschallquelle in m

λ : Wellenlänge in m

f : Frequenz in Hz

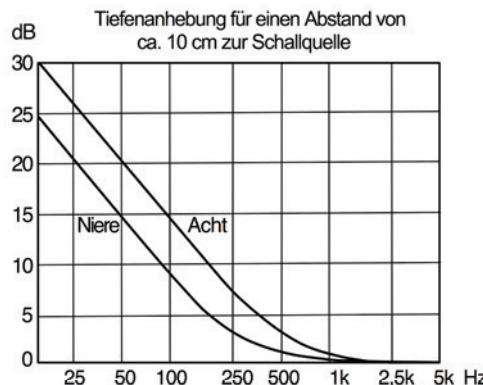


Abb. 9.16: Nahbesprechungeffekt bei Niere und Acht.

Sänger und Sängerinnen nutzen den Nahbesprechungeffekt intuitiv als Mittel der Klanggestaltung, denn das Volumen der Stimme in den tiefen Frequenzen kann durch die Variation des Mikrofonabstandes gezielt beeinflusst werden.

Vergleich von Druckgradienten-Charakteristiken

In Tab. 9.2 sind die Pegelabschwächungen verschiedener idealer Richtcharakteristiken für die Schalleinfallsinkel 0° , 90° und 180° aufgezeigt (siehe auch Abb. 9.17).

Tab. 9.2: Pegelabschwächung bei Nieren- und Acht-Charakteristiken.

Schalleinfalls-winkel	Breite Niere	Niere	Superniere	Hyperniere	Acht
0°	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
90°	-2,5 bis -3,5 dB	-6 dB	-8,7 dB	-12 dB	$-\infty$ dB
180°	-6 bis -10 dB	$-\infty$ dB	-11,5 dB	-6 dB	0 dB

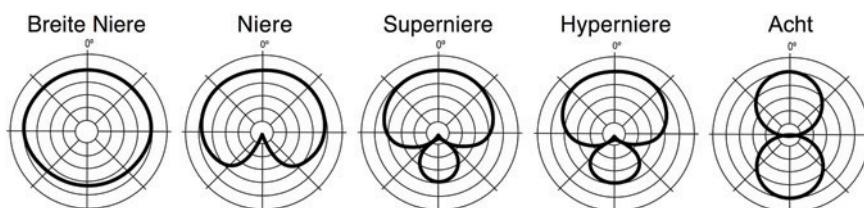


Abb. 9.17: Druckgradienten-Charakteristiken.

9.2.3 Interferenzempfänger

Zur weiteren Verbesserung der Richtwirkung können Mikrofone mit einem Richtrohr versehen werden (Abb. 9.18 und 9.19). Im Rohr befinden sich Schaumstoffe mit verschiedenen Dämpfungseigenschaften, die den Schall an die Kapsel weiterleiten. Durch die Bauweise des Richtrohrs überlagern sich Schallwellen, die von der Seite eintreffen, ganz oder teilweise gegenphasig und löschen sich aus (destruktive Interferenz, s. Kap. 1.2.2). Schallwellen, die direkt von vorne kommen, überlagern sich dagegen gleichphasig und erfahren aufgrund konstruktiver Interferenz eine Verstärkung.

Die Charakteristik des Interferenzempfängers entspricht einer Keule, ist aber wie alle anderen Richtcharakteristiken frequenzabhängig. Die Wellenlänge der tiefsten Frequenz, die noch gebündelt wird, entspricht etwa der Länge des Rohres, und dieses kann zwischen 10 bis 40 cm lang sein. Eine Länge von 10 cm entspräche einer Grenzfrequenz von ca. 3440 Hz, bei 40 cm reicht die Richtwirkung schon bis ca. 860 Hz. Unterhalb der Grenzfrequenz hat das Mikrofon dann die Richtwirkung des verwendeten Empfängerprinzips, also der eigentlichen Kapsel. Diese ist zumeist ein Druckgradientenempfänger (Niere oder Superniere).

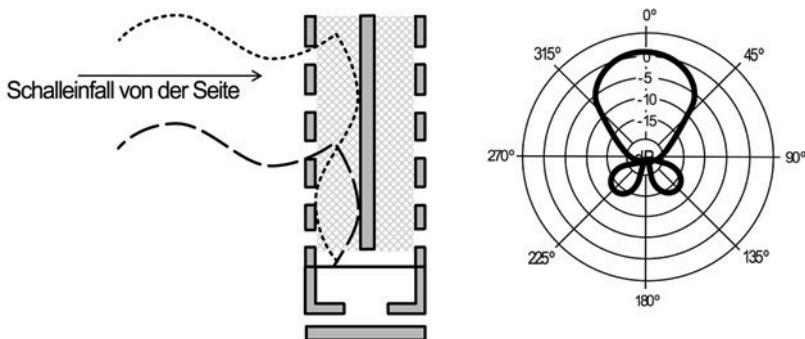


Abb. 9.18: Interferenzempfänger.



Abb. 9.19: Richtrohrmikrofon (Schoeps CMIT 5U).

Druckgradienten- und Interferenzempfänger reagieren empfindlich auf Wind und Luftbewegungen, wie sie durch Sprechen oder Singen hervorgerufen werden. Die Folge sind tieffrequente Störgeräusche: Ein tiefes Rumpeln bei Wind bzw. „Plosivlaute“ der menschlichen Stimme, vor allem beim „p“ und „t“. Eine mit Gaze ausgekleidete Draht- oder Blechkonstruktion schützt daher die Mikrofonkapsel vor Wind- und Popgeräuschen (Popschutz-Schirm, Abb. 9.20). Weitere Hilfsmittel, wenn dies nicht ausreichen sollte sind ein Schaumstoff-Windschutz oder Windschutzkorb, letzterer eventuell auch mit Fellüberzug (Abb. 9.21 und 9.22). Meist muss auch ein Hochpassfilter verwendet werden, der das tieffrequente Rumpeln bedämpft.



Abb. 9.20: Popschutz-Schirm vor einem Neumann TLM170.



Abb. 9.21 Links: Schaumstoff-Windschutz. **Rechts:** Windschutzkorb mit Fellüberzug.



Abb. 9.22: Schoeps Windschutzfamilie.

15 Mischpulte



Ein Mischpult ist die „Schaltzentrale“ einer Beschallungsanlage. Die Funktionsweise von Mischpulten wird meist anhand des prinzipiellen Signalflusses erklärt. Im Lehrplan ist das Thema Mischpulte für das zweite Lehrjahr vorgesehen.

Mischpulte fassen verschiedene Audioquellen zusammen, das ist wohl ihre Hauptaufgabe. Daneben gibt es die Möglichkeit zur Klangbearbeitung durch integrierte Filter und mittels extern angeschlossener Effektgeräte. Über diverse Ausgänge findet eine Signalverteilung statt.

Mischpulte können anhand ihrer Bauweise und ihres Einsatzgebiets unterschieden werden.¹

15.1 Bauweisen

Mischpulte in analoger Technik: Analoge Pulte zum Mischen mehrerer Audiosignale gibt es bereits seit Mitte der 1920er Jahre. Die ersten Mischapparate hatten nur wenige Eingangskanäle (anfangs vier bis acht) und konnten die Signale lediglich auf eine Mono-Summe zusammenmischen. Gegen Ende der 1970er Jahre war mit automatisierten Konsolen mit weit über 100 Eingangskanälen schließlich der Höhepunkt der analogen Schaltungstechnik erreicht.

Mischpulte in analoger Technik mit digitaler Steuerung wurden erstmals in den 1980er Jahren gebaut. Pulte in dieser Technik erlaubten es, Einstellungen abzuspeichern und später wieder abzurufen. Oft war das „Mischpult“ nur die Bedienoberfläche für die Audioschaltungen, welche in einem Schaltschrank ausgelagert waren. Diese Pulte konnten sich nicht lange auf dem Markt halten, sie wurden inzwischen durch volldigitale Mischpulte abgelöst.

Digitalpulte: Seit Mitte der 1990er Jahre werden vorwiegend leistungsfähige Pulte eingesetzt, bei denen die Audio- und die Steuersignale ausschließlich digital verarbeitet werden. Im Prinzip ist ein digitales Mischpult ein Computer, der die Signale mittels Rechenoperationen manipuliert. Das Herzstück sind hier die integrierten Schaltkreise, meist DSP (Digital Signal Processor).

15.2 Einsatzgebiete

Mischpulte für Mehrspuraufnahmen (Studiopulte)

Studiomischpulte für Mehrspuraufnahmen bieten umfangreiche Schaltmöglichkeiten zur Auswahl der gewünschten Aufnahmespur (Routing), und neben den Eingangskanälen gibt es eine Monitor-Section für eine Abhörmischung der aufgenommenen Signale. Studiopulte können im Split- oder im Inline-Konzept aufgebaut sein.

Splitpulte: Input- und Monitor-Section sind auf der Bedienoberfläche räumlich getrennt. Bei der Aufnahme und der späteren Abmischung wird jeweils ein anderer Signalfluss realisiert (Abb. 15.1 bis 15.3).

¹ Hinsichtlich der historischen Aspekte verweise ich auf meine Dissertation „Die Geschichte des Tonmischpults“.

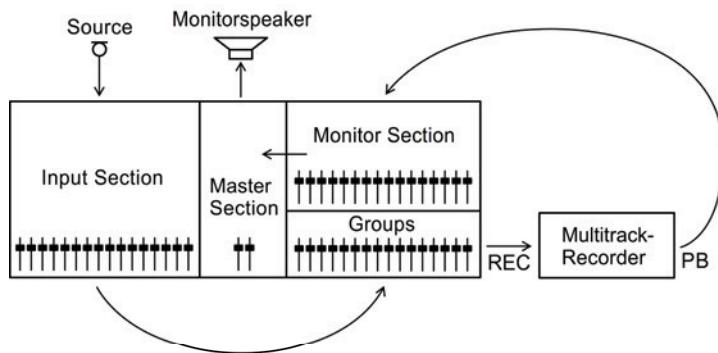


Abb. 15.1: Split-Konzept – Signalfluss bei der Aufnahme.

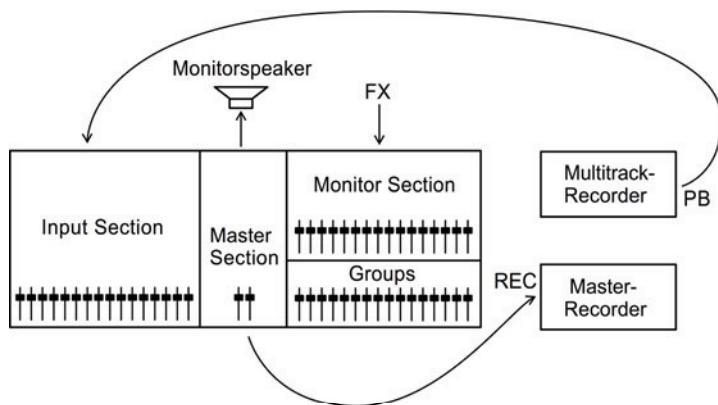


Abb. 15.2: Split-Konzept – Signalfluss bei der Abmischung.



Abb. 15.3: Splitpult in einem Tonstudio (DDA AMR24).

Inline-Pulte: Input und Monitor sind hier im Kanalzug vereint. Ein Kanal hat also zwei Eingänge und auch zwei Pegelsteller (meist einen großen und einen kleineren). Den Signalfluss bei der Aufnahme und der Abmischung zeigen Abb. 15.4 und 15.5. Ein typisches Inline-Studiopult ist in Abb. 15.6 zu sehen.

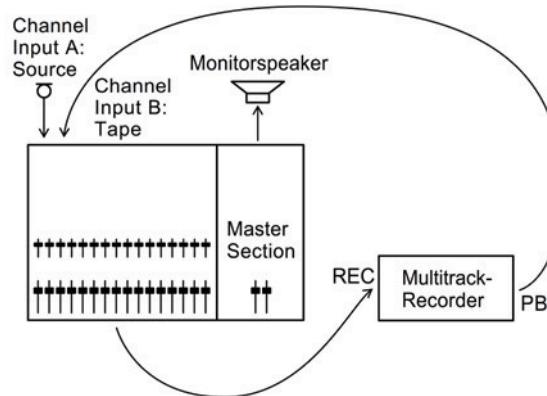


Abb. 15.4: Inline-Konzept – Signalfluss bei der Aufnahme.

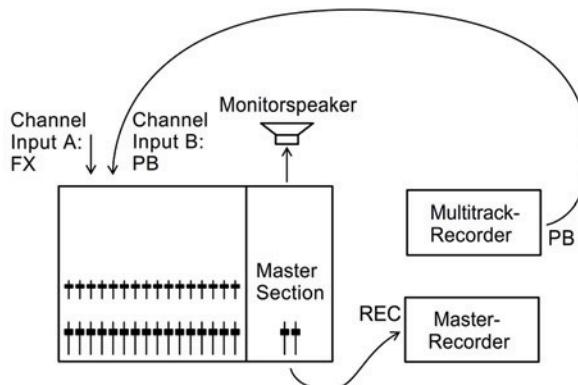


Abb. 15.5: Inline-Konzept – Signalfluss bei der Abmischung.



Abb. 15.6: Inline-Konsole (Audient ASP8024).

Die Unterscheidung nach Mischpultkonzepten war sinnvoll, als es noch ausschließlich analoge Pulte auf dem Markt gab. Heutzutage werden in fast allen Bereichen digitale Mischpulte eingesetzt, die aufgrund ihrer Flexibilität sowohl im Studio als auch für die Beschallung verwendet werden können. Die meisten Digitalmischer haben ausreichend Kanäle für die zusätzliche Abhörmischung einer Mehrspuraufnahme, und es kann so problemlos der Signalfloss wie bei einem Splitpult realisiert werden. Wenn das digitale Pult pro Kanal zwei umschaltbare Eingänge hat, ist auch eine ähnliche Arbeitsweise wie beim analogen Inline-Konzept möglich.

Mischpulte für die Beschallung

Im Vergleich zu Studiopulten ist der Signalfloss bei einem Beschallungspult (Abb. 15.7) eher einfach gehalten. Als Besonderheit haben professionelle Beschallungspulte eine Mischmatrix, die eine umfangreiche Signalverteilung von verschiedenen Gruppenmischungen ermöglicht (Abb. 15.8). Auf den genauen Signalfloss eines analogen Beschallungspultes geht Kap. 15.3 ein.



Abb. 15.7: Analoges Beschallungspult (CADAC J-Type).

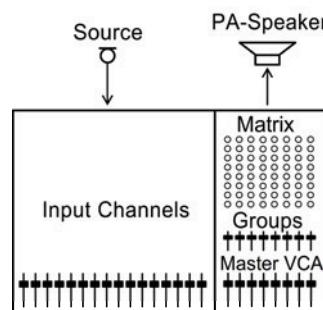


Abb. 15.8: Beschallungspult mit Mischmatrix.

Ein Monitormischpult ist eine besondere Ausführung eines Beschallungspultes mit zusätzlichen, übersichtlich gestalteten Ausspielwegen für verschiedene Monitormischungen. Daneben verfügt es über umfangreiche Vorhörschaltungen. Große Monitormischpulte wie das in Abb. 15.9 haben ebenfalls eine Mischmatrix. Allerdings werden hier nicht die Gruppen, sondern die Ausspielwege weiter verteilt.



Abb. 15.9: Analoges Monitor-Mischpult (Soundcraft Monitor5).

Broadcast-Pulte

Broadcast-Pulte für TV und Radio (Abb. 15.10) haben eine Faderstart-Funktion integriert. Wird ein Fader aufgezogen, so wird durch einen Schaltkontakt im Regler das entsprechende Zuspielgerät eingestartet. Oft sind auch Kompressoren oder Gates in den Kanälen integriert (s. Kap. 16.1.2. „Regelverstärker“). Weiterhin gibt es manchmal eine $n-1$ -Matrix, die beispielsweise bei einer Sendung mit Telefonschaltung zur Anwendung kommt: Der Anrufer hört hier alle (n) Signale aus dem Studio, nicht aber sich selber (Minus 1). So werden Rückkopplungen und störende Echos bei Schaltgesprächen vermieden.



Abb. 15.10: Radio Broadcastpult (Sonifex S2 mit Ablagefläche für ein Sprecherskript).

Tragbare Mischer für mobile Einsätze

Tragbare Mischer werden bei Fernseh- oder Filmtonaufnahmen am Drehort eingesetzt und nutzen daher Akkus zur Stromversorgung. Aufgrund der handlichen Baugröße kann es natürlich nur eine begrenzte Anzahl von Ein- und Ausgangskanälen geben.

Der in Abb. 15.11 gezeigte tragbare Mischer SQN-4S Mini hat vier Eingänge – jeweils zwei für Mikrofonsignale und zwei für Signale mit Leistungspegel – und zwei Ausgänge. Integriert ist auch eine MS-Dekodierung, damit eine MS-Mikrofonierung (s. Kap. 10.2.1) schon am Drehort per Kopfhörer in Stereo abgehört werden kann.



Abb. 15.11: Tragbarer Mischer (SQN-4S Mini).

DJ-Mixer

DJ-Pulte erlauben den direkten Anschluss von Plattenspielern. Dazu ist ein Phono-Vorentzerrer im Kanaleingang integriert, und mit diesem wird das Signal der Schallplatte mit dem richtigen Frequenzgang wiedergegeben (RIAA-Wiedergabekennlinie, Abb. 15.12 Rechts). Zudem gibt es einen quer eingebauten Cross-Fader (Abb. 15.13, der Regler ganz unten), der ein einfaches und schnelles Überblenden von zwei Stereokanälen ermöglicht.

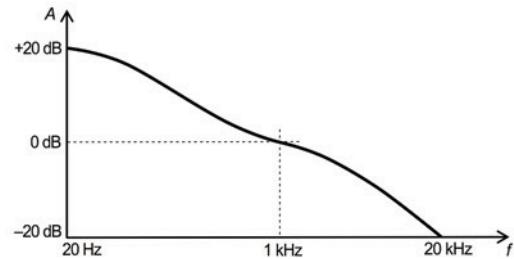


Abb. 15.12 Links: Phono-Eingänge an einem DJ-Mixer. Rechts: RIAA-Wiedergabekennlinie.



Abb. 15.13: DJ-Mixer (GMR PM400).

Line-Mixer

Line-Mixer sind reine Sammelschienen für Signale mit Leistungspegel. Sie kommen oft ohne Klangbearbeitung aus und sind meist im 19 Zoll-Rackformat gebaut. Anwendungsbeispiele: Vormischungen von mehreren Keyboards, Einspielungen in ein Theaterfoyer etc.

15.3 Signalfluss eines analogen Beschallungspultes

Bei einem analogen Beschallungspult werden durch die *Mikrofonverstärker* die Pegel der Quellsignale angepasst, *Filter* bieten die Möglichkeit zur Klangbearbeitung, und mit den *Inserts* gibt es Einschleifwege für externe Effekte. Über die *Busse* werden mehrere Signale zusammengefasst; ein Mischpult ist damit eine Sammelschiene. In diesem Kapitel wird dieser Signalfluss Schritt für Schritt erläutert.

15.3.1 Mono-Eingangskanal

Abb. 15.14 zeigt das Schaltbild eines Mono-Eingangskanals. Im Folgenden werden die einzelnen Baugruppen bzw. Funktionseinheiten dieses Kanals systematisch im Signalfluss verfolgt und erklärt.

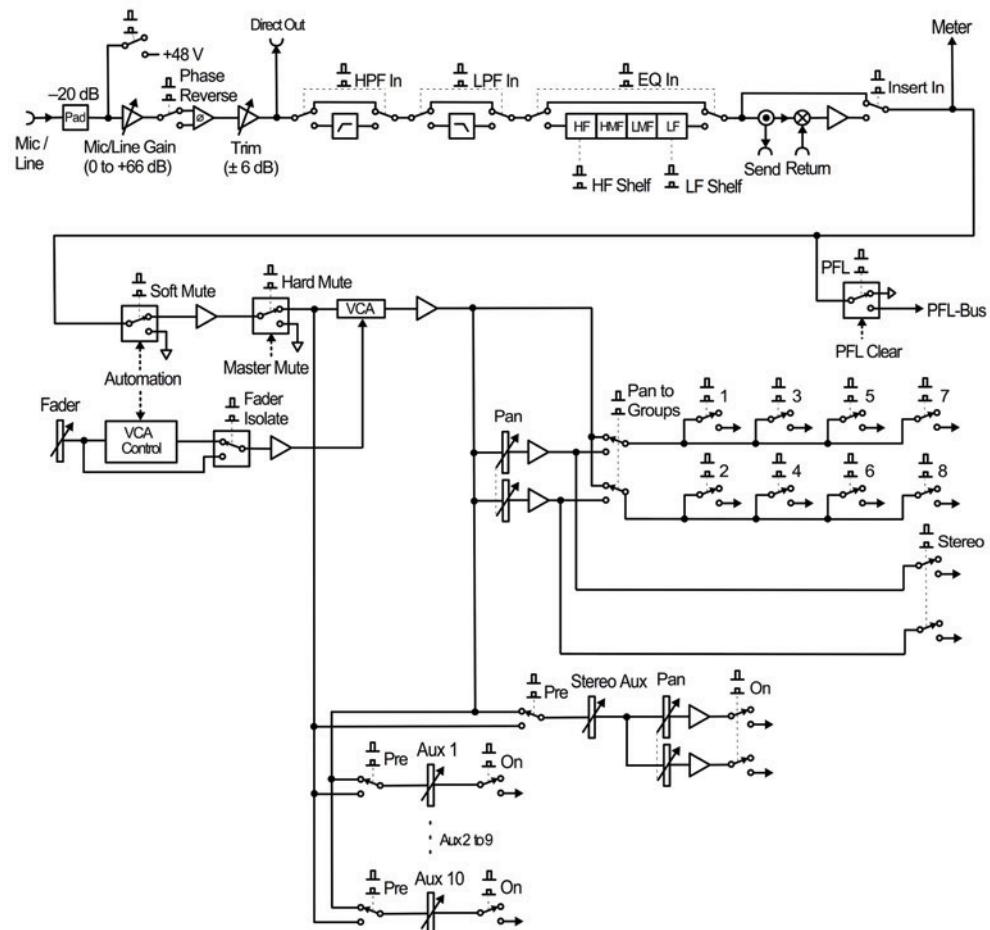


Abb. 15.14: Signalfluss Mono-Eingangskanal.

18 Lautsprecher



Lautsprecher sind als elektrisch-akustische Wandler das letzte Glied in der Signalkette einer Beschallungsanlage. Laut Lehrplan steht dieses Thema im ersten Lehrjahr an.

Lautsprecher wandeln elektrische in akustische Energie um, sie funktionieren damit also umgekehrt wie Mikrofone. (Tatsächlich lassen sich alle in Kap. 81 aufgeführten Mikrofon-Wandlerprinzipien auch bei Lautsprechern anwenden.) Lautsprecher benötigen zur elektroakustischen Wandlung eine Membran, die durch ein bestimmtes Lautsprecher-Wandlerprinzip (s. u.) in Schwingung versetzt wird. Dabei gilt: Je größer die schallabstrahlende Fläche, der Membranhub und die Frequenz des anregenden Signals, desto mehr Schallenergie wird erzeugt.

18.1 Lautsprecher-Wandlerprinzipien

Die drei wichtigsten elektroakustischen Wandlerprinzipien sind elektrodynamische Wandler, elektrostatische Wandler und piezoelektrische Wandler (Kap. 18.1.1 bis 18.1.3).

18.1.1 Elektrodynamische Lautsprecher

Elektrodynamische Lautsprecher funktionieren nach dem induktiven Prinzip: Auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld wirkt eine Kraft. Diese Kraft wird zur Anregung einer Membran genutzt. Es gibt verschiedene Bauarten, die diesem Prinzip folgen: Konus-, Kalotten- und Druckkammerlautsprecher; daneben Bändchen- und Folienmagnetostaten. Diese Bauweisen werden im Folgenden erläutert.

Konuslautsprecher in Tauchspulenbauweise

Beim Konuslautsprecher in Tauchspulenbauweise ist die Membran an einer Schwingspule befestigt, welche sich im Magnetfeld eines Permanentmagneten befindet. Wenn an der Spule die Ausgangswechselspannung des Leistungsverstärkers anliegt, also ein Wechselstrom fließt, bewegt sich die Spule und damit die Membran analog zur Änderung der Stromrichtung.

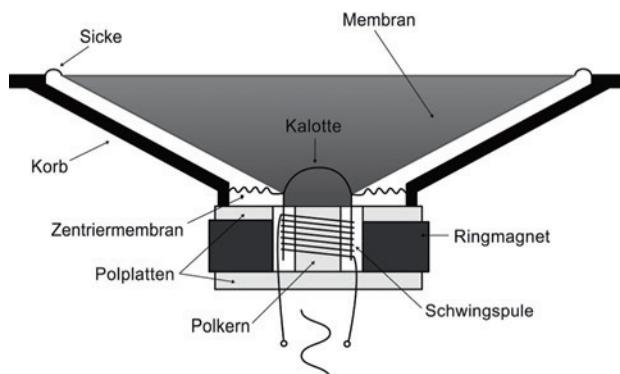


Abb. 18.1: Schnitzzeichnung eines Konuslautsprechers.

Aufbau eines Konuslautsprechers (Abb. 18.1)

- Membran: konisch geformt. Materialien: Pappe, Kunststoff, Textilgewebe oder Aluminium.
- Kalotte: Staubschutz und mechanischer Zusammenhalt der Membran.
- Zentriermembran: elastische Aufhängung der Kalotte und des Spulenträgers.
- Sicke: Die elastische Randaufhängung der Membran. Mögliche Materialien sind zum Beispiel Gummi, Schaumstoff oder ein Gewebe.
 - Weiche Sicke: Bessere Übertragung tiefer Frequenzen; je niedriger die zu übertragende Frequenz ist, desto beweglicher muss die Sicke aufgrund des großen Membranhubs sein.
 - Harte Sicke: Bewirkt eine „harte“ Einspannung der Membran. Anwendung bei Mittel- und Hochtonlautsprechern.
- Korb: Lautsprecherrahmen aus Metall (Abb. 18.2) oder Kunststoff.
- Schwingspule: Kupferspule, auf Aluminiumträger geklebt.
- Ferrit-Magnet, als Ringmagnet ausgeführt.



Abb. 18.2: Konuslautsprecher (Celestion G12M in einem Gitarrenlautsprecher von Vox).

Nachteile von Konuslautsprechern

Konuslautsprecher haben einen geringen Wirkungsgrad von nur ca. 1 %. Das bedeutet, von der Verstärkerleistung werden 99 % nicht in Schall, sondern in Wärme umgewandelt. Zudem treten unerwünschte Eigenresonanzen (Partialschwingungen) der Membran auf, die sich aber durch eine steifere Membran vermindern lassen.

Wirkungsgrad η

Die Effizienz einer Energiewandlung wird durch den Wirkungsgrad η beschrieben. Er ist das Verhältnis von abgegebener Leistung P_{ab} zu zugeführter Leistung P_{zu} :

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad (\text{Formel 18.1})$$

Der Wirkungsgrad ist eine dimensionslose Größe mit Werten zwischen 0 und 1 bzw. zwischen 0 und 100 %.

Konuslautsprecher haben ein schlechtes Impulsverhalten: Aufgrund der relativ großen Masse von Membran und Schwingspule reagiert der Wandler eher träge auf impulsartige Audiosignale. Wie in Abb. 18.3 zu sehen ist, zeigt sich die deutliche Verzögerung in der Ansprache als Einschwingen und direkt darauf folgendes Überschwingen. Nach Abschalten des Signals schwingt die Membran nach, da die bewegte Masse noch die restliche Energie abgibt.

Hörbar wird dieses Verhalten bei impulsartigen Klangereignissen, vor allem mit hochfrequenten Signalanteilen (z. B. Schlagzeug); der subjektive Eindruck wird meist als „verwaschener Klang“ oder „unsaubere Höhenwiedergabe“ beschrieben.

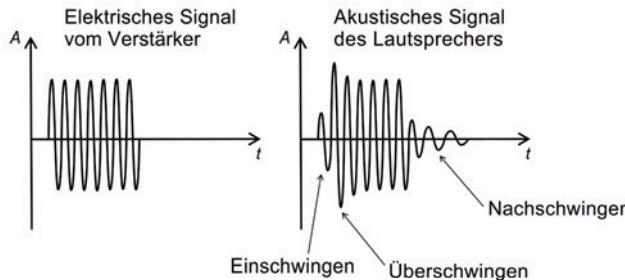


Abb. 18.3: Impulsverhalten eines Lautsprechers bei einem Burst als Testsignal (s. Kap. 19.4.1).

Trotz dieser Nachteile werden Konuslautsprecher in großen Stückzahlen gebaut und in der Be- schallungstechnik bevorzugt eingesetzt. Vor allem deshalb, da es kein anderes Wandlerprinzip vermag, auch tiefe Frequenzen mit hohem Pegel zu übertragen, wie es ein entsprechend groß dimensionierter Konuslautsprecher mit 15 oder 18 Zoll kann. Konuslautsprecher für den Mitteltönbereich haben einheitliche Größen von 8, 10 und 12 Zoll Durchmesser. Bei Hochtönnern kommen andere Wandlerprinzipien eher in Frage.

Kalottenlautsprecher in Tauchspulenbauweise

Ein Kalottenlautsprecher entspricht im Wesentlichen dem Konuslautsprecher, nur fehlt hier der Korb und die Konusmembran (Abb. 18.4). Der Schall wird also nur über die Kalotte abgestrahlt. Aufgrund der kleineren Masse ergibt sich ein etwas besseres Impulsverhalten. Tiefe Frequenzen kann ein Kalottenlautsprecher allerdings nur schlecht übertragen – daher wird er nur als Hochtönlautsprecher eingesetzt, mit Baugrößen von 0,5 bis 3 Zoll Durchmesser.

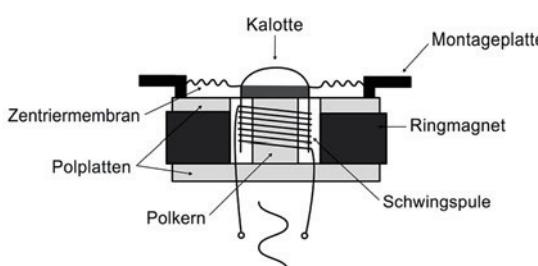


Abb. 18.4 Links: Prinzip Kalottenlautsprecher. **Rechts:** Hochtöner Meyer Sound HD-1.

Druckkammerlautsprecher in Tauchspulenbauweise

Hier komprimiert die Membran eines Kalottenlautsprechers die Luft in einem davor angesetzten Druckraum (Abb. 18.5). Eine schmale Austrittsöffnung führt zu einer erhöhten Strömungs geschwindigkeit der Luft (Geschwindigkeitstransformation). Ein akustisches Element vor der Öffnung dient zum Abschluss der Kammer und ist zur Phasenkorrektur notwendig.

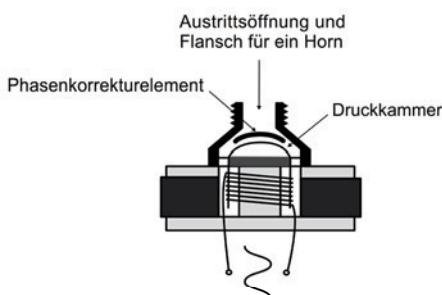


Abb. 18.5 Links: Prinzip Druckkammerlautsprecher. **Rechts:** Hochtonhorn Apogee FT300H.

Der Druckkammerlautsprecher hat gegenüber dem Kalottenlautsprecher den Vorteil, dass durch die Druckkammer der Wirkungsgrad erhöht wird. Allerdings gibt es aufgrund der kleinen Austrittsöffnung eine starke Bündelung des Schalls bei hohen Frequenzen (s. Kap. 3.1.3). Daneben ist ein Hornaufsatz zur akustischen Verstärkung notwendig (s. Kap. 18.2.6). Aufgrund des eingeschränkten Frequenzbereichs von ca. 300 Hz bis 9 kHz kommt nur der Einsatz als Mittel- oder Hochtöner in Frage.

Bändchenmagnetostat

Hier ist die Membran ein stromdurchflossenes Aluminiumbändchen, das sich in einem starken Magnetfeld bewegt (Abb. 18.6). Durch die Bewegungen des Bändchens analog zur Stromänderung des Audiosignals wird Schall abgestrahlt. (Nach dem umgekehrten Prinzip funktioniert das Bändchenmikrofon, s. Kap. 9.1.2.) Bändchenmagnetostaten werden meist als Hochtöner bei kleiner und kompakter Bauweise eingesetzt.

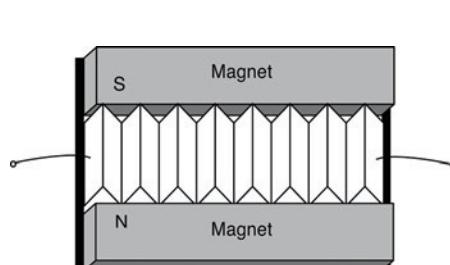


Abb. 18.6 Links: Prinzip Bändchenmagnetostat. **Rechts:** Visaton MHT12.

Vorteile des Bändchenmagnetostaten

- Das Bändchen hat eine minimale bewegte Masse und dadurch ein sehr gutes Impulsverhalten mit schneller Ansprache und geringem Nachschwingen.
- Ein Bändchenmagnetostat hat einen linearen Amplitudenfrequenzgang und einen niedrigen Klirrfaktor (s. Kap. 6.3.5).

Nachteile des Bändchenmagnetostaten

- Bändchenmagnetostaten haben einen geringen Wirkungsgrad.
- Sie haben eine niedrige Nennimpedanz von maximal 1Ω aufgrund der geringen Leiterlänge, daher ist ein Anpassungsübertrager notwendig (s. Kap. 11.1).

Folienmagnetostat

Beim Folienmagnetostaten bewegt sich eine dünne Kunststoff-Folie mit aufgeklebten, stromdurchflossenen Leiterbahnen in einem starken Magnetfeld (Abb. 18.7). Aufgrund der flachen Bauform werden sie auch für Spezialanwendungen eingesetzt, zum Beispiel als Flächenlautsprecher zur Wandmontage.

Vorteile des Folienmagnetostaten

- Die Folie stellt eine kleine bewegte Masse dar, daher hat dieser Wandler ein gutes Impulsverhalten.
- Folienmagnetostaten haben einen hohen Wirkungsgrad bei geringem Klirrfaktor.
- Sie haben einen linearen Impedanz- und einen linearen Amplitudenfrequenzgang.

Im Vergleich zum Bändchen ist kein Übertrager notwendig, da aufgrund des längeren Leiters die Impedanz wie bei Tauchspulenlautsprechern zwischen 4 und 8Ω liegt.

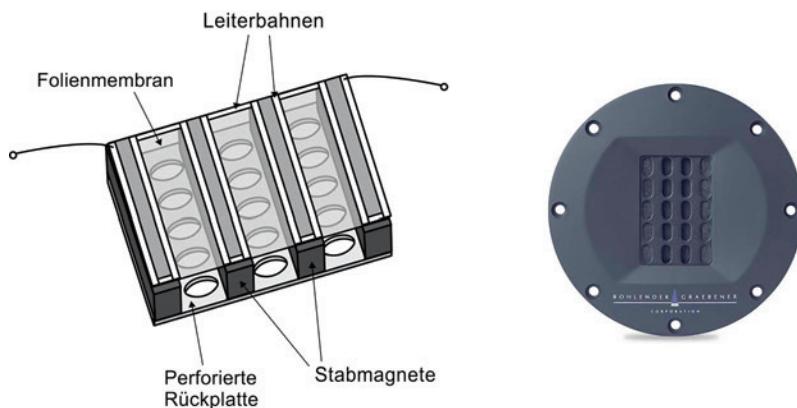


Abb. 18.7 Links: Prinzip Folienmagnetostat. **Rechts:** Bohlender-Graebener NEO-3FP.

Nachteile des Folienmagnetostaten

- Nutzbarerer Frequenzbereich erst ab ca. 200 bis 300 Hz aufwärts, d. h., es ist nur ein Einsatz als Mittel- und Hochtöner sinnvoll.
- Folienmagnetostaten sind teuer.

Air Motion Transformer (AMT)

Der Air Motion Transformer, kurz AMT, ist ebenfalls ein elektrodynamischer Wandler und im weitesten Sinne auch ein Bändchenlautsprecher. Das Prinzip geht auf ein Patent von Oskar Ernst Heil (1908–1994) aus dem Jahre 1972 zurück: Auf eine in Lamellenform gefaltete Membran werden Leiterbahnen so geführt, dass benachbarte Lamellen jeweils in entgegengesetzter Richtung von Strom durchflossen werden. Gegensätzliche Ladungen ziehen sich an, gleichförmige stoßen sich ab – somit bewegen sich auch die Lamellen aufeinander zu oder voneinander weg, je nachdem, ob und wie viel Strom gerade fließt. Dabei wird die Luft in den Zwischenräumen herausgepresst oder angesaugt. Seitlich angebrachte Permanentmagnete vergrößern den Wirkungsgrad dieser Konstruktion. Wie bei den vorher beschriebenen Bändchen- und Folienmagnetostaten liegt der Vorteil des AMT u. a. im guten Impulsverhalten. Von Nachteil ist, dass nur ein Einsatz als Hochtöner in Frage kommt.

18.1.2 Elektrostatische Lautsprecher

Beim Elektrostaten befindet sich eine leitfähige Folienmembran in einem elektrostatischen Feld zwischen zwei perforierten Kondensatorplatten (Abb. 18.8), den Statoren, die mit einer Polarisationsspannung vorgeladen sind. Ein Übertrager wandelt das Signal vom Leistungsverstärker in eine hohe Wechselspannung um, welche die Polarisationsgleichspannung überlagert. Die Folienmembran wird entsprechend den Polarisationsänderungen des elektrischen Feldes von den Statoren angezogen oder abgestoßen.

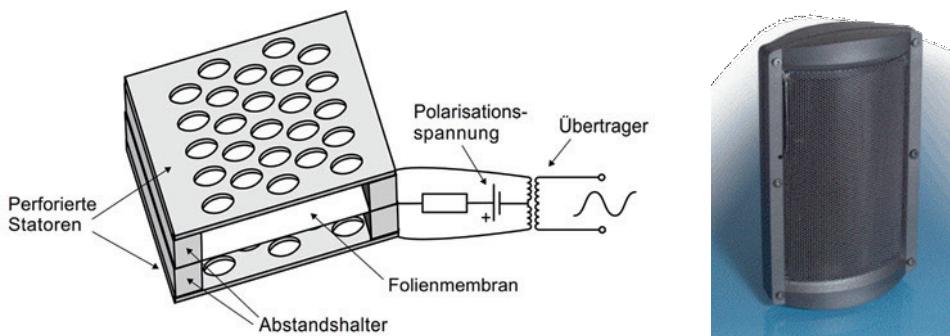


Abb. 18.8 Links: Prinzip Elektrostat. Rechts: T+A elektroakustik Hochtöner TCI 1 RE.

Vorteile des Elektrostaten

- Die Membran hat eine geringe Masse und dadurch ein gutes Impulsverhalten.
- Eine sehr gute Linearität des Amplitudenfrequenzgangs und ein sehr geringer Klirrfaktor.

Nachteile des Elektrostaten

- Eine schlechte Wiedergabe tiefer Frequenzen. Der nutzbare Bereich beginnt ab ca. 200 bis 300 Hz aufwärts (Einsatz als Mittel- und Hochtöner).
- Ein schmaler Abstrahlwinkel.

18.1.3 Piezoelektrische Lautsprecher

Der Wandler des Piezo-Lautsprechers (Abb. 18.9) besteht aus kristallinem oder aus keramischem Material, das sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung verformt.

Vorteil des Piezo-Wandlers

- Einfach in der Herstellung und damit preisgünstig.

Nachteile des Piezo-Wandlers

- Die Bewegungssamplitude des Piezos ist sehr klein, deshalb ist eine akustische Verstärkung durch einen Hornvorsatz notwendig.
- Hoher Klirrfaktor.
- Schlechte Wiedergabe tiefer Frequenzen und daher nur Anwendung als Hochtöner sinnvoll.

Aufgrund der überwiegend schlechten Eigenschaften werden Piezowandler in der professionellen Beschallungstechnik eher selten eingesetzt, sondern z. B. als Ultraschalllautsprecher.



Abb. 18.9: Piezo-Lautsprecher. **Links:** Komplettes Hochttonhorn. **Rechts:** Ausgebauter Piezo-wandler (\varnothing 2 cm) mit aufgeklebter Membran.

22 Videotechnik



Das Thema Bildbearbeitung steht als Unterrichtseinheit im dritten Ausbildungsjahr auf dem Lehrplan. Einige Inhalte der hier vorgestellten Videotechnik gehen auch über das hinaus, was Veranstaltungstechniker in der Ausbildung lernen sollen, aber ein Blick über den Tellerrand kann nicht schaden.

Die Videotechnik ist heutzutage bei vielen Veranstaltungen nicht mehr wegzudenken. Im einfachsten Fall muss nur eine Standbildprojektion einen ansonsten aufwendig von Hand gemalten Hintergrund ersetzen, aber meist sind es doch erheblich komplexere Anforderungen, beispielsweise mit einer oder mehreren Live-Kameras, die das Bühnengeschehen verfolgen und deren Bilder in Kombination mit Videoclips oder Computeranimationen auf verschiedene Leinwände projiziert oder auf Displays wiedergegeben werden. *Anmerkung:* Die Grundlagen zu Licht, Optik und Auge und daneben Informationen zu den verschiedenen Projektionsverfahren und -geräten finden sich im Band „Lichttechnik und Energieversorgung für Veranstaltungstechniker“ (ebenfalls erschienen im S. Hirzel Verlag) und werden daher hier nicht aufgegriffen.

22.1 Videokamera

Der Bildwandler in einer Videokamera (Abb. 22.1) wandelt Licht in elektrischen Strom um. In diesem Kapitel werden die dazu notwendigen optischen und elektronischen Baugruppen erklärt.



Abb. 22.1: Videokamera (Sony DSR-250P).

22.1.1 Optisches System

Objektiv

Objektive bestehen aus einer Kombination verschiedener Linsen (Abb. 22.2). Diese sind in ein Gehäuse aus Metall oder Kunststoff gefasst. Mit einem speziellen Objektivanschluss wird die Optik an der Kamera befestigt. Es gibt unterschiedliche Anschlüsse: C-Mount, PL-Mount oder Arri-Stahlbajonett sind die gängigen Systeme professioneller Kameras.

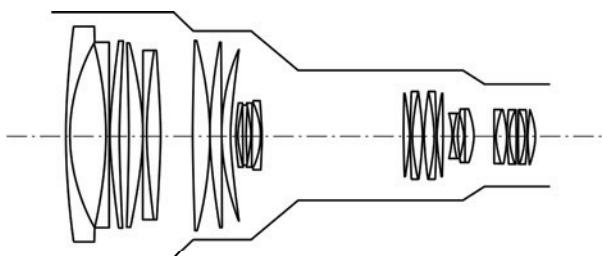


Abb. 22.2: Linsen eines Zoomobjektivs.

Bei der Fertigung der Linsen werden Glassorten mit unterschiedlichen Brechungszahlen verwendet. Das ist notwendig, um Abbildungsfehler durch das Objektiv gering zu halten, die dadurch entstehen, dass Licht unterschiedlicher Wellenlängen auch unterschiedlich gebrochen wird. Dieser Effekt heißt Dispersion und ist vom Prisma bekannt, welches einfallendes weißes Licht in einzelne Spektralfarben zerlegt. Bei einer Linse haben die verschiedenen Farbanteile also unterschiedliche Brennpunkte, man nennt das chromatische Aberration. Die Folge sind unscharfe Farbränder bei der Abbildung auf dem Bildwandlerchip der Kamera. Durch Kombination unterschiedlicher Linsenformen und Glassorten kann der Fehler aber minimiert werden. Diese kombinierten Linsen nennt man Polychromate oder Superchromate. So genannte Achromate können die chromatische Aberration nur für zwei Spektralfarben korrigieren, und Konstruktionen, welche drei Spektralfarben korrigieren, nennt man Trichromate. Die Linsen eines Objektivs sind zur besseren Lichtausbeute und Entspiegelung zusätzlich mit sehr dünnen Metallocid-Schichten vergütet.

Mindestens eine Linse im Objektiv ist mechanisch beweglich und kann durch Drehen des Schärfenrings näher oder weiter zum Brennpunkt hin verschoben werden. Damit wird die Schärfe eingestellt. Als Hilfestellung befindet sich auf dem Schärfenring eine aufgedruckte Skala mit Entfernungsangaben in Metern. Bei einer Normaloptik kann das beispielsweise so aussehen:

0,5 0,8 1 1,25 2 2,5 3 4 5 8 15 ∞

Im Nahbereich lässt sich die Schärfe sehr viel genauer einstellen, für weiter entfernte Objekte fällt es dagegen zunehmend schwerer, eine präzise Einstellung zu finden. Das zeigt sich auch in der Skala: Der Regelweg für den Fernbereich wird immer kleiner. Indirekt kann man daran erkennen, dass der Schärfentiefebereich (s. u.) in der Entfernung größer ist als im Nahbereich.

Die meisten Videokameras sind mit Zoomobjektiven ausgestattet, bei denen durch Verschieben einzelner Linsen oder Linsengruppen die Brennweite eingestellt werden kann. Hochwertige Zoomobjektive sind sehr komplex aufgebaut, da sich beim Ändern der Brennweite der Schärfepunkt nicht verschieben darf und sich die Blendenöffnung entsprechend vergrößern oder verkleinern muss, um die gewählte Blendenstufe (s. u.) beizubehalten. Viele Zoomobjektive haben zudem einen Telekonverter bzw. Verdoppler eingebaut. Wie die Bezeichnung schon sagt, verdoppelt diese Linsenkombination die Brennweite, wenn sie in den Strahlengang geschwenkt wird. Ein 2x-Telekonverter verringert dabei aber auch die Bildhelligkeit um zwei Blendenstufen. Zoomobjektive haben in der Teleeinstellung einen kleineren Bildwinkel und eine größere Brennweite als beispielsweise Normalobjektive, welche bei einigen Videokameras ebenfalls zum Einsatz kommen können. Diese haben einen vertikalen Bildwinkel von ca. 27°, damit ergibt sich bei einem 2/3 Zoll-Wandler eine Brennweite von 13,7 mm. Weitwinkelobjektive, als dritte Variante, haben dagegen einen großen Bildwinkel und eine kleine Brennweite.

Blende

Im Objektiv befindet sich eine Irisblende mit veränderlichem Durchmesser. Die Blende reguliert den Lichteinfall und begrenzt den nutzbaren Bereich der Linse. Dadurch werden Abbildungsfehler im Randbereich vermindert. Die *Blendenzahl* F bezeichnet das Verhältnis von Brennweite zur Öffnungsweite der Blende:

$$\text{Blendenzahl } F = \frac{\text{Brennweite } f \text{ in mm}}{\text{Blendendurchmesser } d \text{ in mm}} \quad (\text{Formel 22.1})$$

Blendenstufen

Je kleiner die Blendenstufe, desto größer die Blendenzahl. Am Objektiv ist eine Skala aufgedruckt, die zum Beispiel so aussehen kann:

$f/1,4 \quad f/2 \quad f/2,8 \quad f/4 \quad f/5,6 \quad f/8 \quad f/11 \quad f/16 \quad f/22 \quad f/32$

Diese Blendenstufen folgen einer international vereinbarten Standardreihenfolge in Bezug auf die Helligkeit des Bildes. In der dargestellten Skala ist 1,4 die weiteste Blendenöffnung, die das Licht vollständig durchlässt und ein helles Bild zur Folge hat. 32 ist die kleinste Blendenöffnung, die nur einen Bruchteil des Lichts durchlässt, und entsprechend ist das Bild dunkler. Die Lichtintensität halbiert sich bei Steigerung um einen Stufenwert. Die Blendenstufen basieren auf dem Faktor $\sqrt{2}$, jede Stufe wird also durch weiteres Multiplizieren von $\sqrt{2}$ berechnet:

Blendenstufe $1,4 \cdot \sqrt{2} = \text{Blendstufe } 2$.

Blendenstufe $2 \cdot \sqrt{2} = \text{Blendstufe } 2,8$ etc.

Die Skala umfasst bei vielen Objektiven Werte, die über die Blendenstufen im gezeigten Beispiel hinausgehen. Manchmal geben die Hersteller auch irreguläre Werte auf der Skala an, beispielsweise 1,8. Das bedeutet, dass diese Blende bis zu einer relativen Blendenöffnung von 2 noch eine annehmbare Bildqualität liefert, nicht aber bis zur nächst kleineren Blendenzahl 1,4. So genannte High-Speed-Objektive mit einer relativen Öffnung von $f/1$ erlauben ein Drehen mit sehr wenig Licht, zum Beispiel im Kerzenschein. Bei einer großen (weit offenen) Blende ergibt sich eine geringe Schärfentiefe, bei einer kleinen (geschlossenen) Blende eine hohe Schärfentiefe (Abb. 22.3 und 22.4). Möchte man also eine Szenerie mit hoher Schärfentiefe aufnehmen, muss für eine entsprechende Ausleuchtung gesorgt werden, damit die Blende möglichst klein eingestellt werden kann.

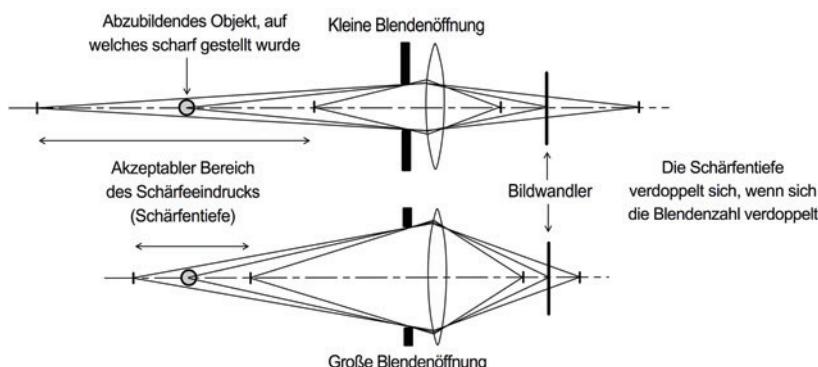


Abb. 22.3: Blendenöffnung und Schärfentiefe.



Abb. 22.4: Schärfentiefe als Gestaltungsmittel.

Auflagemaß

Das Auflagemaß ist der Abstand zwischen der Auflagefläche im Objektivanschluss und dem Bildwandler. Durch Stöße oder Temperaturänderungen kann sich das Auflagemaß verändern, und auch nach einem Objektivwechsel muss es kontrolliert werden. Ist das Auflagemaß bei einem Zoomobjektiv falsch eingestellt, so weist die Schärfeebene bei verschiedenen Brennweiten unterschiedliche Lagen auf. Oder einfacher ausgedrückt: Beim Zoomen verlagert sich die Schärfe im Bild.

Die korrekte Einstellung erfolgt so: Ein kontrastreiches Motiv, am besten ein so genannter Siemensstern (eine spezielles Testmotiv), wird in ca. 3 bis 5 m Entfernung in maximaler Telestellung bei normaler Beleuchtung und offener Blende scharf eingestellt. Eine eingeschaltete Detailkontrastverstärkung (Peaking) im Kamerasucher oder die Bildwiedergabe über einen guten Monitor erleichtern die Schärfebeurteilung. Dann wird herausgezoomt und in maximaler Weitwinkelstellung die Schärfe kontrolliert. Gegebenenfalls muss nun das Auflagemaß mit der entsprechenden Arretierschraube am Objektiv verändert werden. Diesen Vorgang wiederholt man mehrmals, bis die optimale Einstellung gefunden ist.

Optische Filter

Vor dem Bildwandler befinden sich mehrere optische Filter:

Filterrad: Verschiedene Konversionsfilter zur Anpassung an die Farbtemperatur (3200 K bei Kunstlicht oder bis zu 6500 K bei Tageslicht) und Grau- bzw. Neutraldichtefilter (ND-Filter) zur Abschwächung der Lichtintensität (Tab. 22.1).

Tab. 22.1: Beispiel Filterräder: Digibeta-Camcorder Sony DVW709WSP.

Konversionsfilterrad	Neutraldichtefilterrad
Position A = 3200 K + Kreuzfilter	Position 1 = Kein Filter (Clear)
Position B = 3200 K	Position 2 = 1/4 ND (-2 Blendenstufen)
Position C = 4300 K	Position 3 = 1/16 ND (-4 Blendenstufen)
Position D = 6300 K	Position 4 = 1/64 ND (-6 Blendenstufen)

Infrarotsperrfilter: Das für uns Menschen nicht sichtbare Infrarotlicht wird herausgefiltert, da der Bildwandler in der Kamera im Gegensatz zu unseren Augen auch für Infrarotlicht empfindlich ist. (Bei speziellen Infrarotkameras fehlt dieser Filter natürlich.)

Bei fein gegliederten Bildinhalten kommt es zur Überlagerung von Bild- und Pixelstruktur (Aliasing-Fehler). Durch eine *optische Defokussierung* lässt sich dieser Abbildungsfehler reduzieren.

22.1.2 Bildwandler

Videokameras mit CCD-Bildwandler

Die ersten CCD (= Charge Coupled Devices) wurden 1960 von den Bell Laboratories gebaut. Eigentlich sollte ein neues Speichermedium für Computer entwickelt werden, aber es fiel auf, dass ein CCD auf Licht reagiert. Somit tat sich eine neue Anwendung als Chip für die Bilderaufnahme auf. Ein CCD besteht im Prinzip aus vielen kleinen Fotodioden, welche Lichtenergie in elektrische Energie umwandeln. Eine CCD-Speicherzelle besteht aus einem MOS-Kondensator (Metal Oxide Semiconductor) wie in Abb. 22.5 dargestellt.

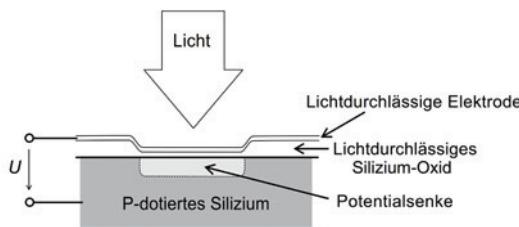


Abb. 22.5: Aufbau einer CCD-Speicherzelle.

Mehrere aneinander gereihte CCD-Speicherzellen ergeben eine CCD-Zeile. Durch die Veränderung der Spannungsniveaus zwischen den einzelnen Zellen kann die Ladung von einer Speicherzelle zur nächsten weitertransportiert werden. Es erfolgt eine räumliche Verschiebung der Ladung zu Zellen hin, die ein noch niedrigeres Potential haben. Damit wird die Ladung über eine ganze CCD-Zeile transportiert. Schieberegister transportieren die elektrischen Ladungen schließlich zu einem Verstärker. Ein Bildpunkt kann nicht einzeln ausgelesen werden, sondern es wird immer nur die integrierte Ladung einer Zeile durch das Schieberegister abgeleitet. Das Auslesen aller Zeilen geschieht parallel, anschließend werden die Ladungen aber seriell in einem Ausgangsknoten an der Ecke des Chips gesammelt. Obwohl die Spannungen an den Elektroden, die den Transport der Ladung bewirken, nur wenige diskrete Zustände annehmen, ergibt die lichtabhängig gesammelte Ladung ein analoges Signal. Bei einer zu großen Gesamtlichtmenge wird die Speicherkapazität der einzelnen CCD-Zellen überschritten, überschüssige Ladung gelangt zu angrenzenden Zellen und verursacht um die überbelichtete Zelle herum ein fehlerhaftes, zu helles Bild. Dieser Effekt bzw. Bildfehler wird *Blooming* genannt.

CCD-Bildwandlerfläche

Eine CCD-Bildwandlerfläche wird aus CCD-Zeilen zusammengesetzt. Durch die MOS-Zellen wird das Bild bei der Wandlung sowohl horizontal als auch vertikal in Bildpunkte (Pixel) zerlegt. Aber nicht alle CCD-Zellen eines Chips werden zur Bildwandlung genutzt. CCD weisen einen Dunkelstrom auf, der mit Hilfe lichtdicht abgedeckter Pixel (Optical Black) korrigiert werden kann (Abb. 22.6 Links). Für die CCD-Abmessungen wurden die Maße der Wandlerflächen von den alten Röhrenbildwandlern übernommen; in professionellen Kameras werden meist 2/3 Zoll-CCD eingesetzt. Eine möglichst große Anzahl von Pixeln muss also auf einer relativ kleinen Fläche untergebracht werden (Abb. 22.6 Rechts).

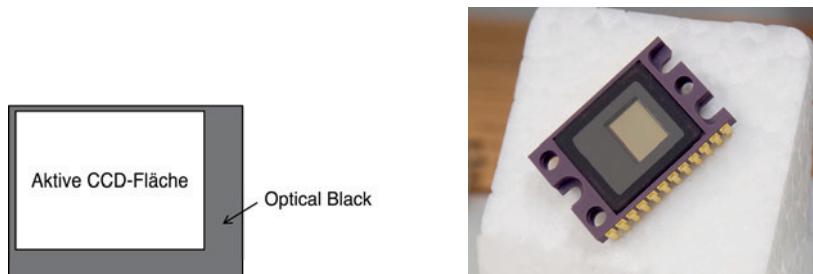


Abb. 22.6 Links: Optical Black. Rechts: CCD-Bildwandler einer professionellen Studiokamera (Philips LDK-Serie); der Chip ist ungefähr so groß wie ein 10 Cent-Stück

Bei diesen kleinen Strukturen lassen sich Fehler beim Fertigungsprozess nicht vermeiden, und deshalb müssen die CCD geprüft und selektiert werden. CCD mit Fehlstellen werden für preiswerte Kameras verwandt, die dann mit Hilfe elektronischer Maßnahmen die Fehler verdecken müssen.

Speicherbereiche

Die Ladungen der Zellen müssen fernsehnormgerecht ausgelesen und zu einem seriellen Signal geformt werden. Da zur Erzielung einer hohen Empfindlichkeit die Ladung in den Zellen möglichst lange auf integriert werden soll, müssen Ladungssammel- und Auslesevorgang getrennt werden. Dies geschieht durch die Nutzung separater Speicherbereiche. Die verschiedenen CCD-Typen werden hinsichtlich der Anordnung ihrer Speicherbereiche in FT-, IT- und FIT-Chips unterschieden.

Frame Transfer (FT)

Unter einem lichtempfindlichen Sensor teil befindet sich ein lichtdicht abgedeckter Speicherbereich (Abb. 22.7). Die Ladungen der CCD-Zeilen werden während der aktiven Halbbilddauer gesammelt, während der Vertikalaustastung (s. Kap. 22.2.1) werden die Ladungen in den Speicherbereich verschoben. In dieser Zeit muss die Sensorfläche durch eine rotierende Flügelblende lichtdicht abgedeckt werden. Am Ausgang des horizontalen Ausleseregisters lässt sich letztlich die Ladung eines Bildes abgreifen. Von Vorteil ist die hohe Pixeldichte und damit eine hohe Empfindlichkeit und gute Auflösung. Ein Nachteil ist die mechanische Blende.

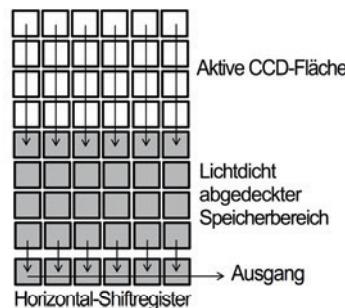


Abb. 22.7: FT-Prinzip.

Interline Transfer (IT)

Der Speicherbereich liegt hier in der Bildwandlerfläche unter lichtgeschützten vertikalen Spalten (Abb. 22.8 Links).

Vorteil: Keine Lichtabdeckung während des Auslesevorgangs nötig. Sehr schnelle Ladungsübernahme in den Speicherbereich.

Nachteil: Geringe Pixeldichte und Anfälligkeit für den *Smear-Effekt* (Licht gelangt in das Transportregister und verfälscht die Ladung). Im Bild ist das als senkrecht verlaufender, heller Strich zur erkennen.

Frame-Interline-Transfer (FIT)

Das Frame-Interline-Prinzip ist eine Kombination von IT- und FT-Technik. Es gibt hier also Speicherspalten in der Sensorfläche und einen zusätzlichen Speicherbereich unterhalb des Bildwandlers (Abb. 22.8 Rechts).

Vorteil: Keine mechanische Blende. Smear-Effekt stark reduziert.

Nachteil: Hoher technischer Aufwand bei der Fertigung. Geringe Pixeldichte.

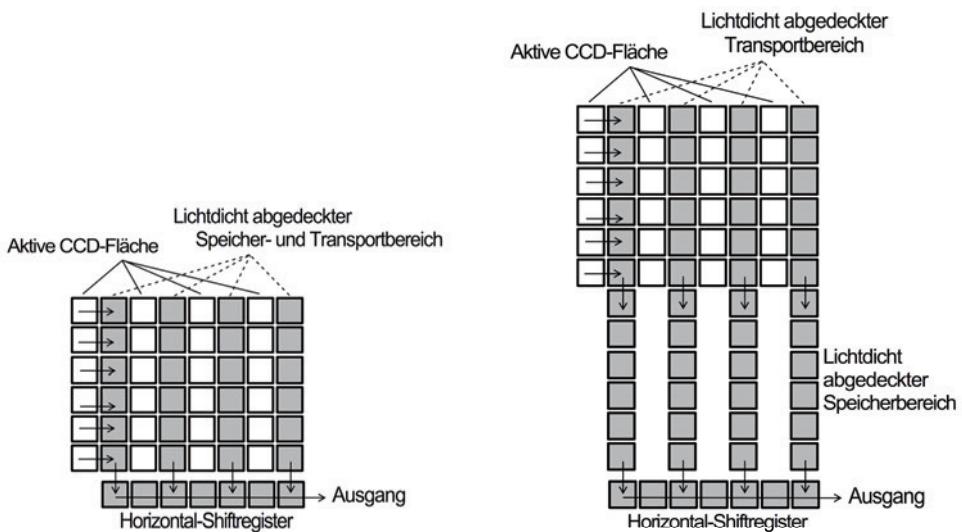


Abb. 22.8 Links: IT-Prinzip. **Rechts:** FIT-Prinzip.

Lens on Chip

Durch Mikrolinsen auf dem CCD-Chip wird Licht, das auf die abgedeckten Bereiche fällt, in den lichtempfindlichen Bereich gelenkt. Dadurch wird zum einen die Lichtausbeute erhöht und zum anderen der Smear-Effekt reduziert.

Elektronischer Shutter

Durch den elektronischen Shutter wird die Belichtungszeit verkürzt, um auch schnelle Bewegungsabläufe ohne Unschärfe darstellen zu können. Die normale Belichtungszeit beträgt 1/50 Sekunde. Mit Shutter sind zum Beispiel aber auch 1/60, 1/125, 1/250, 1/500, oder 1/1000

möglich. Verfügt die Videokamera über die Funktion „Clear Scan“ (CLS), ist auch eine stufenlose Einstellung der Belichtungszeit möglich. Anwendung: Abfilmen von Computermonitoren ohne störende Interferenzstreifen. Im Shutter-Betrieb sinkt die Empfindlichkeit des Bildwandlers, daher muss zum Ausgleich die Blende oder die Verstärkung verändert werden.

Empfindlichkeit von CCD-Chips

FT-CCD sind aufgrund der größeren Pixel prinzipiell empfindlicher als IT- und FIT-CCD. Die meisten Videokameras benötigen eine Beleuchtungsstärke von 2000 Lux, um bei Blendenstufe 8 einen Videopegel von 100 % zu erreichen. Eine zusätzliche Verstärkung ist meist möglich, allerdings vermindert sich dann der Signal-Rausch-Abstand. In der Praxis werden Verstärkungswerte von +3 bis +9 dB verwendet, was einer halben bis 1 1/2 Blendenstufen entspricht (Tab. 22.2). Die Maximalverstärkung beträgt bei vielen professionellen Kameras +18 dB, bei einer höheren Verstärkung fällt das Bildrauschen (s. u.) unangenehm auf.

Tab. 22.2: Verstärkung und Blendenstufen.

Verstärkung	Verstärkungsverhältnis	Blendenstufen
+3 dB	1,4	1/2 Blende
+6 dB	2	1 Blende
+9 dB	2,8	1 1/2 Blenden
+12 dB	4	2 Blenden

CCD-Rauschen

In Bildwandlern treten zwei Arten von Rauschen auf:

- Thermisches Rauschen, auch Dunkelstromrauschen genannt.
- Fixed Pattern Noise durch Unregelmäßigkeiten beim CCD-Aufbau.

Der Signal-Rausch-Abstand eines guten CCD-Bildwandlers beträgt etwa 60 dB.

Farbbilderzeugung mit drei CCD-Wandlern

Das einfallende Licht wird durch einen Prismensatz mit dünnen dichroitischen Beschichtungen auf dem Glas, welche Licht frequenzselektiv absorbieren bzw. reflektieren, in die Primärfarben Rot, Grün und Blau zerlegt (Abb. 22.9).

Nachteile des Strahlenteilers: Es ergibt sich ein langer Strahlengang für das einfallende Licht, und die Brennweiten der Optiken müssen darauf angepasst werden, d. h., es können keine Standard-Filmobjektive verwendet werden. Daneben müssen die Prismen und die einzelnen Bildwandler enge Fertigungstoleranzen aufweisen und die CCD sehr genau ausgerichtet sein, um die absolute Deckungsgleichheit (Konvergenz) der drei Farbsignale zu gewährleisten.

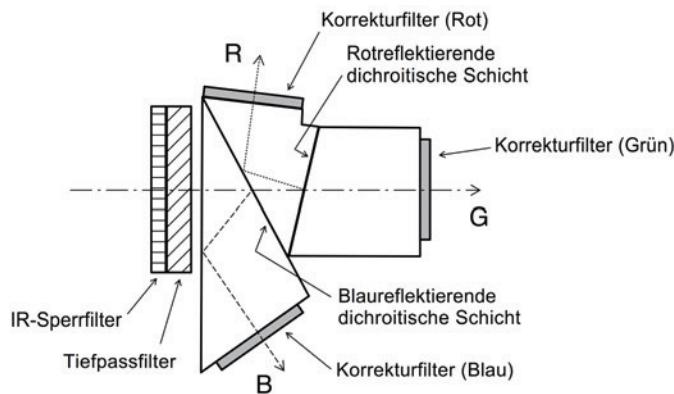


Abb. 22.9: Strahlenteilerprisma.

Bildformatwechsel bei CCD-Kameras

Die 16 : 9-Bilderzeugung kann bei einem 4 : 3-Wandler mit einem anamorphotischen Objektivvorsatz erfolgen. Bei der Wiedergabe wird das Bild dann wieder elektronisch auseinander gezogen und die ursprünglichen Proportionen wieder hergestellt. Horizontale Auflösungsverluste sind allerdings der Nachteil dieser Methode (Abb. 22.10 Links).

Recht einfach kann dagegen das 4 : 3-Format mit einem 16 : 9-Wandler erzeugt werden. Die Seitenbereiche werden für 4 : 3 beschnitten. Nachteil: Bildinhalte in den abgeschnittenen Randbereichen gehen verloren (Abb. 22.10 Rechts).

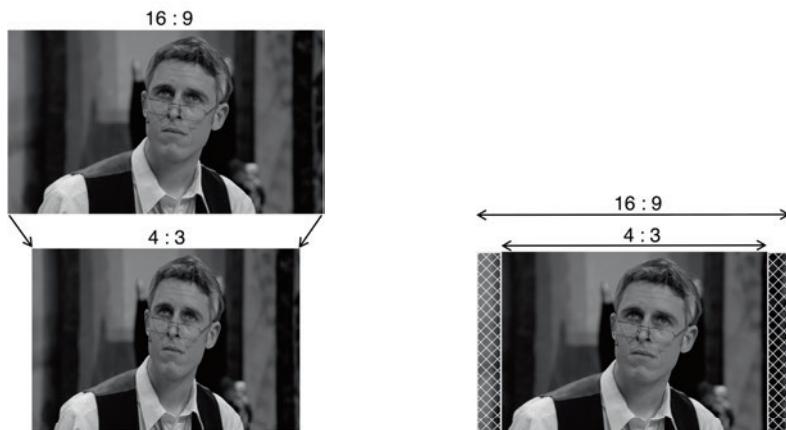


Abb. 22.10 Links: Anamorphe Bildkompression. **Rechts:** Bildbeschneidung.