

Kapitel 10

Aufnahmeverfahren

Stefan Weinzierl

10.1 Signaleigenschaften und Kontrollinstrumente	552
10.1.1 Aussteuerung und Pegel	552
10.1.2 Korrelation und Polarität	565
10.2 Monofone Aufnahme	569
10.2.1 Mikrofonabstand	569
10.2.2 Ausrichtung	570
10.3 Zweikanalstereofone Aufnahmen	571
10.3.1 Intensitätsstereofonie	574
10.3.2 Laufzeitstereofonie	578
10.3.3 Äquivalenzstereofonie	582
10.3.4 Trennkörperstereofonie	584
10.3.5 Binaurale Aufnahme	586
10.4 Mehrkanalstereofone Aufnahmen	588
10.4.1 Koinzidenzverfahren	592
10.4.2 Laufzeitverfahren	594
10.4.3 Gemischte Verfahren	595
10.5 Mikrofonierung und Klanggestaltung	600
10.5.1 Hauptmikrofon versus Einzelmikrofone	601
10.5.2 Klangliche Eigenschaften von Hauptmikrofonverfahren	602
10.5.3 Hauptmikrofone und Stützmikrofone	604
Normen und Standards	606
Literatur	606

Die *Aufnahme* ist der Teil einer Audioübertragung, bei dem akustische Signale (Luftschall, Körperschall) mit Hilfe elektroakustischer Wandler in elektrische Signale umgewandelt werden. Bei stereofoner Übertragung werden die Signale bereits bei der Aufnahme mehrkanalig so kodiert, dass bei der Wiedergabe eine bestimmte klangliche und räumliche Abbildung erzielt werden kann. Die Wahl eines Aufnahmeverfahrens berührt also stets

- technische Aspekte, (Wandlung und Kodierung des Audiosignals),
- psychoakustische Aspekte (Verhältnis zwischen Signaleigenschaften und Wahrnehmung) und
- ästhetische Aspekte (Einsatz von Aufnahmeverfahren mit dem Ziel einer spezifischen Klanggestaltung).

Die Eigenschaften und Unterschiede verschiedener Aufnahmeverfahren können akustisch bzw. psychoakustisch ohne Weiteres erklärt werden. Als Erklärung für die große Vielfalt an eingesetzten Wandlertypen und Aufnahmeverfahren vor allem im Bereich der Musikproduktion kommt also nur die offensichtlich große Bandbreite klanggestalterischer Intentionen bei der Abbildung von Schallquellen in Frage. Das Kapitel gibt einen systematischen Überblick über elektroakustische Aufnahmeverfahren, ohne dass es eine Anleitung für das praktische Vorgehen bei der Aufnahme bestimmter Klangquellen geben will.

10.1 Signaleigenschaften und Kontrollinstrumente

Für die Überwachung und Beurteilung von Audiosignalen steht ein breites Spektrum von Kontrollinstrumenten zur Verfügung. Es soll einerseits den Signalverlauf in technischer Hinsicht und für die Anforderungen eines bestimmten Wiedergabeverfahrens optimieren und andererseits die letztendlich maßgebliche auditive Kontrolle durch visualisierte Messwerte bestätigen bzw. ergonomisch entlasten. Neue Übertragungssysteme, Aufnahme- und Wiedergabeverfahren mit erweitertem Dynamikbereich, höherer Kanalzahl, breiterem Frequenzspektrum und anderem Störverhalten erfordern eine ständige Anpassung der Kontrollinstrumente. Dabei geraten neue Anforderungen häufig in Konflikt mit eingespielten Verfahrensweisen bei Aufnahme, Bearbeitung und Wiedergabe. Einen Überblick über Audio-Kontrollinstrumente und deren Einsatz geben (Brixen 2001) und (Frießecke 2003).

10.1.1 Aussteuerung und Pegel

Als *Aussteuerung* bezeichnet man in der Audiotechnik eine im Hinblick auf den Übertragungskanal optimierte Einstellung des Signalpegels. Angestrebt wird dabei

- eine optimale Ausnutzung der Systemdynamik und
- eine Anpassung der Lautheit des Programminhalts, insbesondere in der Balance zu anderen Programminhalten.

Die technische Systemdynamik der Übertragungskette ist nach oben durch die Übersteuerungsgrenze und nach unten durch das Eigenrauschen des Systems begrenzt. Eine optimale Ausnutzung der Systemdynamik wird bei *Vollaussteuerung* erreicht, d. h. wenn die Obergrenze des Aussteuerungsbereichs gerade erreicht wird. Ein Überschreiten dieser Grenze wird als *Übersteuerung* bezeichnet.

Die Vollaussteuerung digitaler Systeme ist nach AES17 bei einer Signalamplitude von 0 dBFS (dB bezogen auf *Full Scale*) erreicht, die dem Maximum des darstellbaren Zahlenbereichs zugeordnet ist. Oberhalb dieser Eingangsamplitude wird der Signalverlauf abgeschnitten, dieses sog. *Clipping* induziert einen steilen Anstieg nichtlinearer Verzerrungen (Abb. 10.1). Weniger eindeutig ist die Vollaussteuerung analoger Systeme (Übertrager, Verstärker, elektroakustische Wandler, analoge Bandaufzeichnung) definiert. Analoge Systeme weisen oberhalb eines bestimmten Signalpegels meist einen allmählichen Anstieg nichtlinearer Verzerrungen auf, bedingt durch eine zunehmende Nichtlinearität der Übertragungskennlinie in diesem Bereich. Die Aussteuerungsgrenze des Systems wird dann durch die zulässigen nichtlinearen Verzerrungen definiert, wobei die Grenzwerte nicht einheitlich definiert sind. Bei Mikrofonen wird der Schalldruck, bei dem das Signal mit einem Klirrfaktor von 0,5 % (seltener: 1 %) verzerrt wird, als *Grenzschalldruck* definiert (DIN EN 60268-4). Bei magnetischer Bandaufzeichnung ist als Vollaussteuerung ein Signalpegel definiert, der am Ausgang einen Klirrfaktor von (in der Regel) 1 % entsprechend 40 dB Klirrdämpfung hervorruft (DIN 45510, Abb. 10.1). Bei Verstärkern beziehen sich die Angaben zur Aussteuerungsgrenze je nach Hersteller auf Klirrfaktoren von 0,1 bis 1 %, DIN EN 60268-3 sieht hierfür einen sog. *Nenn-Klirrfaktor* von 0,2 bis 0,25 % vor. Auch bei Lautsprechern ist die Grenze nicht einheitlich definiert. Während die Maximalbelastung von Studiomonitoren in der Praxis bei 1 bis 3 % Klirrfaktor angesetzt wird, gelten für Beschallungssysteme typische Grenzwerte von 3 % bis 10 % (vgl. Kap. 8.4.7). Wie steil nichtlineare Verzerrungen oberhalb dieser Grenze ansteigen, hängt von den eingesetzten elektrischen Schaltungen ab. So verhalten sich Röhrenverstärker „gutmütiger“ als Transistoren und Operationsverstärker, die in ihrem Übersteuerungsverhalten dem Clipping digitaler Systeme ähneln. Die mit dem Sättigungsverhalten analoger Systeme wie Röhrenverstärker und analoger Bandmaschinen verbundene Kompression und ein Anstieg nichtlinearer Verzerrungen kann dabei auch als Mittel der Klanggestaltung eingesetzt werden.

Bei Rundfunkaufnahmen spricht man von Vollaussteuerung, wenn das Programm einen festgelegten Signalpegel (Rundfunknormpegel, in Deutschland 1,55 V = +6 dBu), angezeigt auf einem Spitzenspannungs-Aussteuerungsmesser mit definierten Eigenschaften nach DIN IEC 60268-10 erreicht und nur unwesentlich und selten überschreitet.

Beim Übergang vom analogen in den digitalen Bereich muss ein analoger Übernahmepegel definiert werden, der 0 dBFS auf digitaler Ebene entspricht. Da bei A/D- und D/A-Wandlern selbst hierfür kein Standard existiert (s. Kap. 17.1.3.4), wird der Übernahmepegel mit einem vorgeschalteten Analogverstärker hergestellt, mit dem professionelle Wandlerysteme im Audibereich ausgestattet sind. Wichtig ist ein identischer Übernahmepegel bei A/D- und D/A-Wandlung, da sonst – etwa beim Abhören vor und hinter dem Wandler – unerwünschte Pegelsprünge entstehen. Dieser Übernahmepegel wird in der Praxis unterschiedlich eingestellt. Lediglich bei den Rundfunkanstalten besteht wegen des Austauschs von Programmmaterial auch über die Landesgrenzen hinweg die Notwendigkeit von einheitlichen Richtlinien. Dabei gilt in Europa für den Übernahmepegel eine Empfehlung von +18 dBu (EBU R68), in den USA +24 dBu (SMPTE RP155).

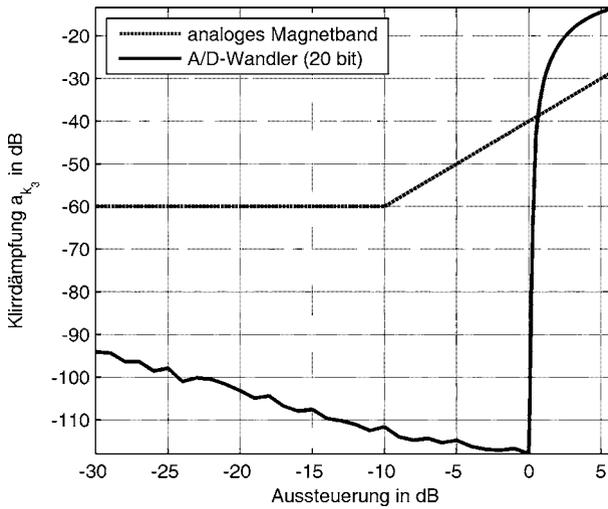


Abb. 10.1 Übersteuerungsverhalten analoger und digitaler Systeme: Abnahme der Klirrdämpfung a_{k3} für analoge, magnetische Bandaufzeichnung (schematisch) und für einen 20-bit-A/D-Wandler (Messwerte). Bereits bei einer Übersteuerung von +1 dBFS sind die Verzerrungen des digitalen Systems größer als die des analogen Systems, dessen Aussteuerungsgrenze hier bei 40 dB Klirrdämpfung entsprechend 1 % Klirrfaktor angesetzt wird.

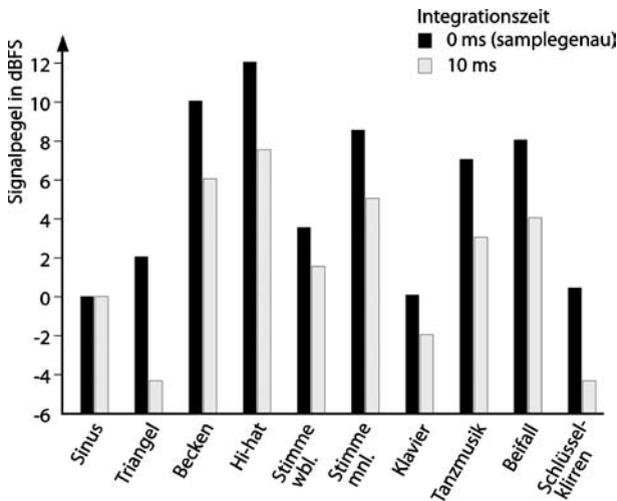


Abb. 10.2 Hörbarkeitsschwelle für digitale Übersteuerungen bei unterschiedlichen Programminhalten, angezeigt durch einen Aussteuerungsmesser mit 0 ms Integrationszeit (samplegenaue Anzeige) und 10 ms Integrationszeit, nach (Jakubowski 1984)

10.1.1.1 Eigenschaften von Aussteuerungsmessern

Aus den oben genannten Kriterien für eine gute Aussteuerung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzten Aussteuerungsmesser und ihr dynamisches Verhalten. Für eine optimale Einstellung des *Signalpegels* ist eine Anzeige mit kurzer Mittelungszeit (definiert als Integrationszeit oder Einschwingzeit, s. Tabelle 10.1) erforderlich, die auch kurzzeitige Pegelspitzen sichtbar macht, die insbesondere bei digitalen Systemen zu hörbaren Verzerrungen führen können (Abb. 10.1 und 10.2). Für eine optimale Einstellung der *Lautheit* ist eine Anzeige mit längerer Mittelungszeit geeigneter, da kurzzeitige, nicht übersteuernde Pegelspitzen für den Lautheitseindruck weitgehend irrelevant sind. Da sich die Verwendung von separaten Pegel- und Lautheitsanzeigen in der Praxis (noch) nicht durchgesetzt hat, folgen die meisten marktgängigen Aussteuerungsmesser einem Kompromiss hinsichtlich der Mittelungszeit. Sowohl der Betrag, um den der Spitzenpegel durch die Mittelung bei der Anzeige verfehlt wird, als auch die Hörbarkeit von eventuellen Übersteuerungen, ist vom Programminhalt abhängig. Für ein breites Spektrum an Programminhalten (Musik, Sprache) ergeben sich Differenzen zwischen 2 und 7 dB zwischen samplegenauer Anzeige und einer Anzeige mit 10 ms Integrationszeit, wie sie bei Spitzenspannungs-Aussteuerungsmessern (PPM) üblich ist. Gleichzeitig kann bei breitbandigen und impulshaften Signalen mit hohem Verdeckungspotential (Hi-hat, Becken, Cembalo, Applaus) ein digitales Clipping erst bei Übersteuerungen von 8–12 dB hörbar werden, während bei Klaviermusik schon geringfügige Übersteuerungen zu hörbaren Artefakten führen (Abb. 10.2).

Das Verhalten von Aussteuerungsmessern wird nach DIN IEC 60268-10, DIN IEC 60268-17 und IEC 60268-18 durch folgende Eigenschaften definiert:

Tabelle 10.1 Spezifizierte Eigenschaften von Aussteuerungsmessern

Eigenschaft	Bedeutung / Messverfahren	Standard
Bezugsanzeige	Jedes Instrument hat einen Referenzpunkt auf seiner Anzeige. Dieser Referenzpunkt ist per se keinem bestimmten Signalpegel zugeordnet, soll jedoch so gewählt sein, dass er vom Programmpegel nur selten überschritten wird.	DIN IEC 60268-10 DIN IEC 60268-17 ITU-T J.27
Bezugs-Eingangsspannung (Bezugspegel)	Effektivwert eines stationären Sinussignals von 1000 Hz, der die Bezugsanzeige ergibt.	DIN IEC 60268-10 DIN IEC 60268-17
Integrationszeit	Dauer eines Tonimpulses eines 5 kHz-Sinussignals bei Bezugspegel, die eine Anzeige 2 dB unter Bezugsanzeige ergibt.	DIN IEC 60268-10
Einschwingzeit	Zeit, in der der Zeiger bei Anlegen des Bezugspegels 99% der Bezugsanzeige erreicht.	DIN IEC 60268-17
Rücklaufzeit	Zeit, in der die Anzeige nach dem Abschalten eines stationären Eingangssignals von der Bezugsanzeige auf einen definierten Punkt der Skala abfällt.	DIN IEC 60268-10 DIN IEC 60268-17

10.1.1.2 Peak programme level meter (PPM)

Ein Spitzenspannungs-Aussteuerungsmessgerät nach DIN IEC 60268-10 besteht aus einem Verstärker, einem Gleichrichter in Brückenschaltung (Doppelweggleichrichter), einer Integrationsschaltung und einer Anzeige. Diese kann als Drehspulmessgerät, als gestufte Anzeige mit Leuchtdioden (LEDs) oder als segmentiertes Plasma-Display ausgelegt sein (Abb. 10.3). Die Schaltung wird auch als „Quasispitzenspannungsmesser“ (QPPM) bezeichnet, da zwar eine Spitzenspannung gemessen, aber nur der 0,71-fache Wert angezeigt wird. Für sinusförmige Signale entspricht dies dem Effektivwert, nicht aber bei stochastischen Signalen wie Sprache oder Musik. Um den unterschiedlichen Traditionen und Standards der europäischen Rundfunkanstalten Rechnung zu tragen, wurden in DIN IEC 60268-10 drei Typen des PPM spezifiziert mit jeweils unterschiedlichen Anzeigeskalen und unterschiedlichen Bezugspunkten, sowie leicht unterschiedlichem dynamischen Verhalten. Alle PPM-Instrumente weisen im Vergleich zu VU-Anzeigen eine kurze Integrationszeit auf. Die Rücklaufzeit muss hoch sein, damit auch kurzzeitige Spitzenpegel abgelesen werden können und das Bewegungsbild insgesamt nicht zu unruhig wird.

DIN IEC 60268-10 Typ I („DIN Skala“) entspricht dem bis zum Jahr 2000 in DIN 45406 spezifizierten deutschen Aussteuerungsmesser. Bezugsanzeige ist der „0 dB“-Punkt, entsprechend einer Eingangsspannung von 1,55 V (+6 dBu). Die Skala muss mindestens einen Bereich von -40 dB bis +3 dB umfassen. Die in den skandinavischen Rundfunkanstalten übliche „NORDIC Skala“ ist weitgehend mit Typ I konform, allerdings entspricht der „0 dB“-Punkt hier einer Eingangsspannung von 0,775 V (0 dBu). Typ IIa („BBC Skala“) ist Standard bei Rundfunkanstalten in Großbritannien, sie hat Skalenmarkierungen von „1“ bis „7“ mit Abständen von 4 dB zwischen den Skalenstrichen. Der Bezugswert ist „6“ und entspricht einer Eingangsspannung von 1,94 V (8 dBu). Typ IIb ist eine Variante mit zwölfteiliger Skala und Markierungen im Abstand von 2 dB mit einem Referenzpunkt von „+9 dB“ entsprechend 2,18 V (ca. 9 dBu).

Bei PPM-Aussteuerungsmessern für digitale Signale kann die Integrationszeit der Anzeige meist zwischen samplegenauer Anzeige und den bei analogen Geräten üblichen 5 oder 10 ms umgeschaltet werden. Es gibt sie mit einer auf 0 dBFS bezogenen Skala mit „0 dB“ als oberem Skalenende und in einer auf die Gewohnheiten der Rundfunkanstalten zugeschnittenen Version mit „+ 9dB“ als oberem Ende. Diese Variante korrespondiert mit der analogen Aussteuerungspraxis, bei der „0 dB“ nicht den höchstmöglichen Signalpegel markiert, sondern den angestrebten Vollaussteuerungspegel des Programms (Permitted Maximum Level, PML). Für die europäischen Rundfunkanstalten gilt hier nach EBU R68 eine Empfehlung von -9 dBFS. Da in Deutschland der analoge Vollaussteuerungspegel beim Rundfunk traditionell bei 1,55 V (+6 dBu) liegt, ergibt sich daraus ein analog/digitaler Übernahmepiegel von +15 dBu für 0 dBFS. Um die Verwirrung perfekt zu machen, wird der digitale PPM-Aussteuerungsmesser auch noch mit einer dem analogen DIN-Aussteuerungsmesser entsprechenden Skala mit „+5 dB“ am oberen Ende angeboten (Abb. 10.3). Hier liegt ein digital voll ausgesteuertes Signal dann bereits außerhalb der Skala.

Bei samplegenauer Anzeige kann meist eingestellt werden, ab welcher Anzahl aufeinander folgender Samples mit 0 dBFS eine OVER-Anzeige ausgelöst wird. Üblich sind hier Werte zwischen 1 und 10. Auch bei maximaler Empfindlichkeit (ein Sample) ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Anzeige zwar den Spitzenwert des digitalen Signals, nicht zwangsläufig jedoch den Spitzenwert des zugehörigen analogen Signalverlaufs anzeigt, der ja zwischen zwei Abtastzeitpunkten liegen kann. Insbesondere nach einer Umtastung (sample rate conversion, SRC) kann daher auch ein zunächst mit 0 dBFS angezeigtes Signal übersteuert sein. Dies könnte mit einer „True Peak“-Anzeige nach ITU-R BS.1770 vermieden werden, die auf einer internen Überabtastung des Signals basiert. Sie hat jedoch noch keine Verbreitung gefunden.

Spitzenspannungs-Aussteuerungsmesser sind häufig mit folgenden Funktionen ausgestattet: Die *Fast*-Option verringert die Integrationszeit auf 0,1 ms, die *Peak hold* oder *Memo*-Option hält den Maximalpegel für eine einstellbare Zeit (hold) oder bis zum Zurücksetzen der Anzeige (reset), und zur Kontrolle niedrig ausge-

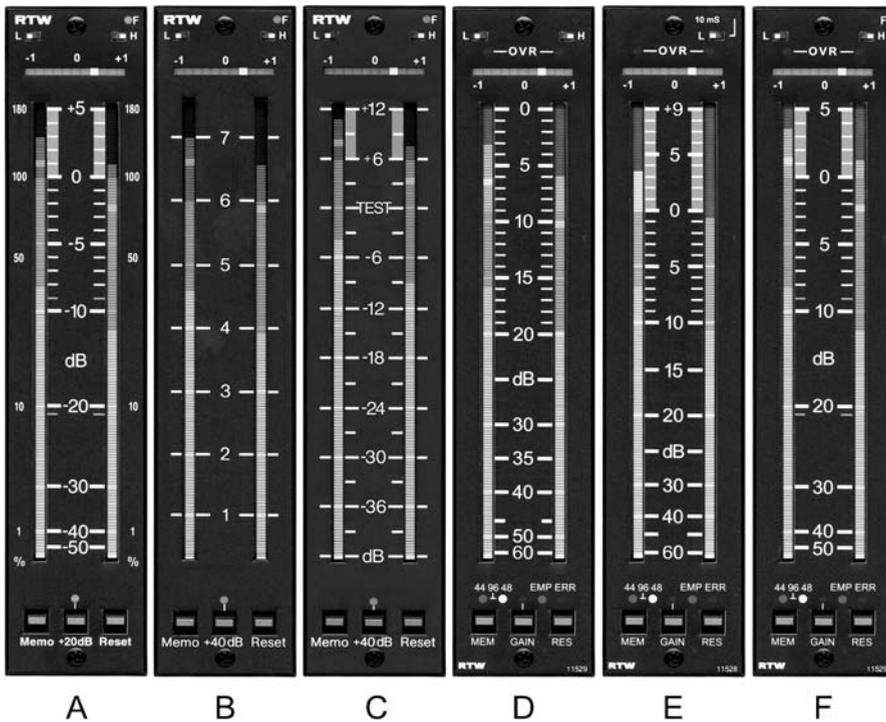


Abb. 10.3 Spitzenspannungs-Aussteuerungsmessgeräte nach DIN IEC 60268-10. A–C: Analoge Aussteuerungsmesser (DIN Skala, British Skala, Nordic Skala), D: Digitaler Aussteuerungsmesser bezogen auf 0 dBFS, E–F: Digitale Aussteuerungsmesser bezogen auf 0 dB = -9 dBFS nach EBU R68. Zusätzlich zur Spitzenwertanzeige mit 10 ms (A–C) bzw. 0 ms (samplegenau, D–F) Integrationszeit wird als hellkeitsüberlagerter Balken ein Lautheitswert nach (RTW 2005) angezeigt (s. Abschn. 10.1.1.4), bei digitalen Anzeigen (D–F) wahlweise ein Lautheitswert oder ein Spitzenwert mit auf 10 ms verlängerter Integrationszeit (© RTW Köln).

steuerter Programmteile lässt sich eine Verstärkung der Anzeige um +20 oder +40 dB zuschalten (Abb. 10.3).

Tabelle 10.2 Eigenschaften von Spitzenspannungs-Aussteuerungsmessgeräten (PPM)

	DIN Skala	NORDIC Skala	British Skala	EBU Skala	Digital Peakmeter
Standard	DIN IEC 60268-10 Typ I		DIN IEC 60268-10 Typ IIa	DIN IEC 60268-10 Typ IIb	IEC 60268-18
Bezugsanzeige	„0 dB“	„0 dB“	„6“	„+9 dB“	„0dB“
Bezugsspannung	1,55 V	0,775 V	1,94 V	2,18 V	0 dBFS (Varianten s. Text)
Integrationszeit	5 ms	5 ms	10 ms	10 ms	0 ms / 10 ms (umschaltbar)
Rücklaufzeit	1,7 s (0 dB bis -20 dB)	1,7 s (0 dB bis -20 dB)	2,8 s („7“ bis „1“)	2,8 s („+12 dB“ bis „-12 dB“)	1,7 s (0 dB bis -20 dB)

10.1.1.3 VU-Meter

Das vor allem in den USA verbreitete VU (*volume unit*) Meter (die in DIN IEC 60268-17 vorgesehene Kleinschreibung „*vu*“ hat sich in der Praxis nicht durchgesetzt) besteht – wie das PPM – aus einem Messgerät mit Doppelweggleichrichter und einem Abschwächer mit einstellbarer Dämpfung. Abhängig von der eingesetzten Gleichrichterschaltung, für die es in den Standards keine Vorgaben gibt, misst das VU-Meter einen Wert zwischen dem Gleichrichtwert und dem Effektivwert (Wilms 1977, s. Kap. 1.2.3). Die Anzeige ist jedoch so kalibriert, dass für Sinussignale (und nur für diese) der Effektivwert angezeigt wird. Das VU-Meter weist mit 300 ms eine wesentlich höhere Einschwingzeit auf als der in Europa weiter verbreitete Spitzenspannungsmesser. Die Skala umfasst einen Bereich von -20 bis +3 VU mit einer zusätzlichen Prozentskala, bezogen auf die Eingangsspannung von 1,228 V (+4 dBu), die der Bezugsanzeige von „0 VU“ ohne Dämpfung entspricht. Durch die Effektivwert-Charakteristik des Gleichrichters und die lange Einschwingzeit der Anzeige kann der Spitzenpegel des angelegten Signals, abhängig von der Impulshaftigkeit des Programms, allerdings bis zu 20 dB höher liegen als der angezeigte Wert.

Würde man dies berücksichtigen, um Übersteuerungen nachfolgender (insbesondere digitaler) Übertragungsglieder zu verhindern, müsste sich die Anzeige bei der Aussteuerung von impulshaften Programminhalten stets am unteren Ende der Skala bewegen. Um dies zu vermeiden, sind manche VU-Meter mit einer einstellbaren Verstärkung (*lead*) von üblicherweise zwischen +4 und +14 dB ausgestattet, um die Anzeige wieder in die Mitte der Skala „zurückzuholen“. Allerdings sind einfache VU-Meter in Mischpulten und analogen Bandmaschinen selten mit diesem

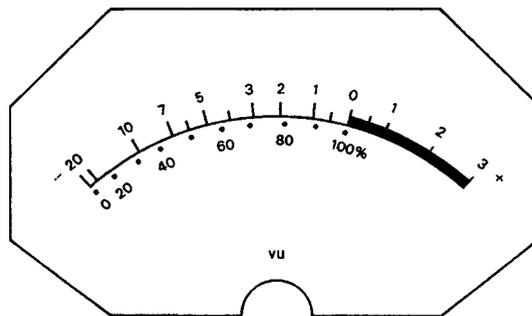


Abb. 10.4 Standard VU Display als Zeigerinstrument

Zusatz ausgestattet. Da das VU-Meter für die Aussteuerung digitaler Übertragungstrecken wenig geeignet ist, hat es in jüngerer Zeit an Bedeutung und an Verbreitung verloren. Details zu Geschichte und Schaltungstechnik findet man bei (Ballou 2002).

10.1.1.4 Aussteuerung und Lautheit

Immer wenn durch Aussteuerung unterschiedliche Programminhalte in ein ausgeglichenes Lautheitsverhältnis gebracht werden sollen, stellt sich das Problem, dass Audiomaterial mit gleichem Spitzenpegel einen sehr unterschiedlichen Lautheitsindruck hervorrufen kann. In Abb. 10.5 ist diese Tatsache für drei kommerzielle Audioproduktionen (Sinfonische Musik, Sprache, Popmusik) mit gleichem Spitzenpegel illustriert, bei denen sich die energieäquivalenten Mittelwerte des Signalpegels nach (1.10) als ein mögliches Maß für die Lautheit des Programms um mehr als 7 dB unterscheiden. Um Lautheitssprüngen beim Wechsel von Programminhalten vorzubeugen, gelten insbesondere beim Rundfunk Aussteuerungsrichtlinien, nach denen Sprache mit einem PPM-Aussteuerungsmesser 6 dB leiser als klassische Musik, und Populärmusik 6 dB leiser als Sprache angesteuert werden soll (Dickreiter 1997). Da diese Werte angesichts der Vielfalt von Programminhalten nur grobe Anhaltspunkte darstellen können, und da insbesondere die häufig weitgehend automatisierten Sended Abläufe von Rundfunkstationen keine auditive Kontrolle mehr vorsehen, ist eine technische Lautheitsmessung und bei Bedarf auch Lautheitsanpassung von zunehmender Bedeutung. Die von zahlreichen kommerziellen Aussteuerungsmessgeräten angebotenen Lautheitsanzeigen basieren allerdings auf unterschiedlichen Lautheitsmodellen und liefern daher zum Teil stark abweichende Anzeigen. Einen ausführlichen Überblick über diese Varianten geben (Skovenborg u. Nielsen 2004).

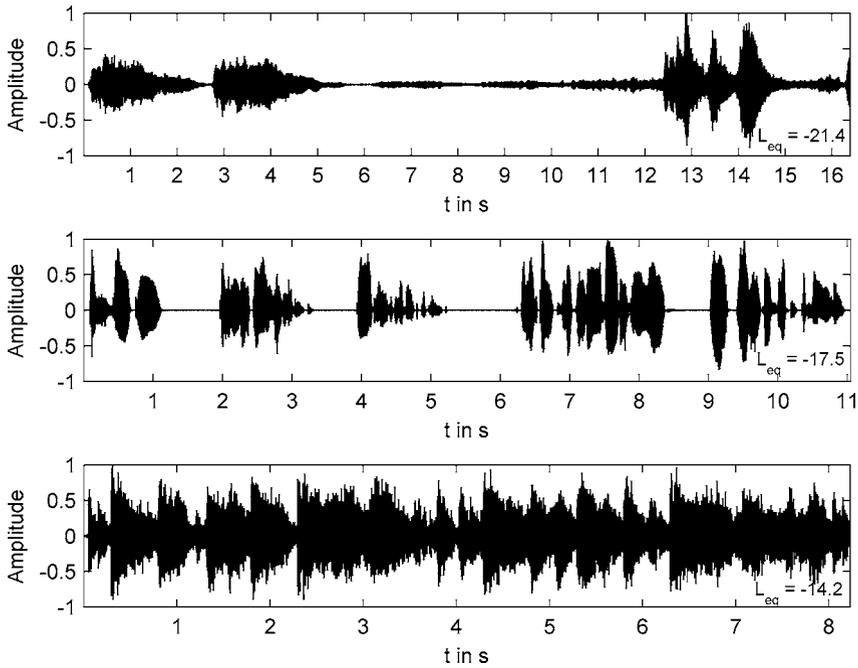


Abb. 10.5 Signalamplitude und energieäquivalenter Mittelwert L_{eq} , bezogen auf 0 dBFS, für Aufnahmen mit gleichem Spitzenpegel
 Oben: Sinfonische Musik (L. v. Beethoven, *Fünfte Symphonie*, Anfang)
 Mitte: Sprache (Gerd Wameling liest Fontane)
 Unten: Popmusik (Prince, *Thunder*)

L_{eq} -Messungen

Ein häufig verwendeter Indikator für die Lautheit von Schallsignalen ebenso wie von breitbandigem Audiomaterial ist der über eine vorgegebene Zeitspanne T gemittelte energieäquivalente Mittelwert des Pegels L_{eq} für ein Audiosignal $x(t)$:

$$L_{\text{eq}} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{x^2(t)}{x_{\text{ref}}^2(t)} dt \quad (10.1)$$

Der Mittelungspegel L_{eq} kann dabei auf eine vorgegebene Signalamplitude x_{ref} bezogen werden. Unabhängig von der zeitlichen Mittelung können zur Berücksichtigung der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Gehörs verschiedene Bewertungsfilter zum Einsatz kommen (Abb. 10.6): Dazu gehört die bei akustischen Geräuschmessungen meist verwendete A-Kurve und die für höhere Schallpegel vorgesehenen B- und C-Kurven nach DIN EN 61672 sowie die für Störspannungsmessungen in der Tontechnik ursprünglich in CCIR 468-3 spezifizierte und in DIN

45405 übernommene „CCIR-Kurve“, die in modifizierter Form von der Fa. Dolby unter der Bezeichnung $L_{eq}(M)$ auch für Lautheitsbestimmungen im Kinton genutzt wird (M für *movie*, vgl. Abschn. 21.3.2). Dazu kommt eine in Zusammenhang mit ITU-R BS.1770 spezifizierte sog. RLB-Kurve (Soulodre u. Norcross 2003, s. Abb. 10.8) als Kompromiss zwischen der B- und C-Kurve.

Bei L_{eq} -Messungen muss stets ein Zeitfenster vorgegeben werden, für das die Berechnung nach (10.1) dann einen Einzahlwert als Maß für die Lautheit des Segments liefert.

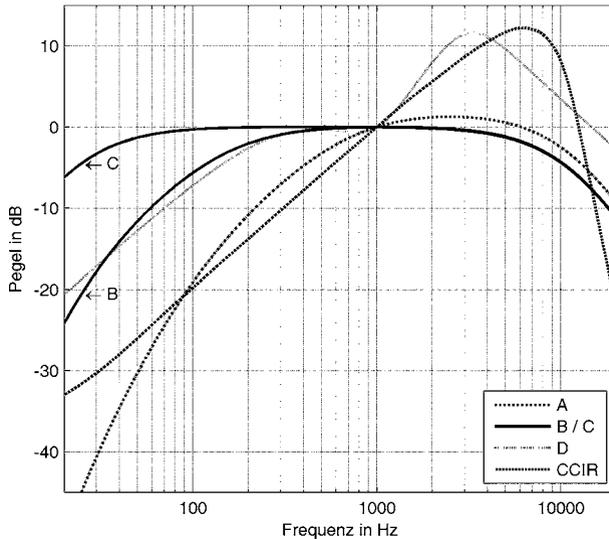


Abb. 10.6 Frequenz-Bewertungsfelder zur Lautheitsbestimmung von Audiosignalen

PPM- oder VU-Messungen

Auch das Ausgangssignal eines Spitzenspannungs-Aussteuerungsmessers (PPM) kann mit einer Frequenzbewertungskurve gewichtet werden. So verwendet die Lautheitsanzeige der Fa. RTW (in Abb. 10.3 angezeigt durch den hellbeleuchteten Teil des Aussteuerungsbalkens) ein PPM mit gegenüber den üblichen 10 ms verlängerter Integrationszeit und einer eigenen Frequenzbewertungskurve, die ausgehend von der 80 dB-Isophone nach ISO/R26 durch Hörversuche optimiert wurde (RTW 2005). Das Loudness Meter der Fa. Dorrrough entspricht einer VU-Anzeige mit einer auf etwa das Doppelte verlängerten Mittelungszeit ohne Frequenzbewertung. Um aus den so gewonnenen Zeitsignalen einen Mittelwert für vollständige Programmsegmente zu gewinnen, kann eine Häufigkeitsanalyse der Pegelwerte durchgeführt werden.

Hierbei fanden Spikofski u. Klar (2004) eine optimale Korrelation von im Hörversuch ermittelten Lautheitsangaben mit dem Pegelperzentil L50, d.h. dem mit einem Spitzenspannungs-Aussteuerungsmessgerät (PPM) ermittelten Pegel, der während 50 % der Analysedauer überschritten wurde (Abb. 10.7). Hierfür war eine

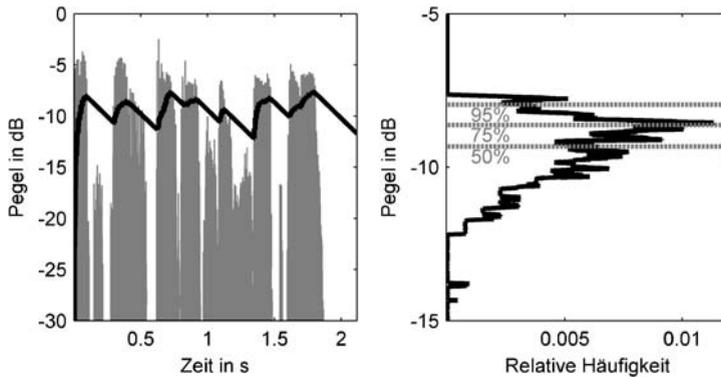


Abb. 10.7 Lautheitsbestimmung auf Grundlage von PPM-Pegelperzentilen. Links: Zeitsignal (grau) und PPM-Signalverlauf mit 10 ms Integrationszeit (schwarz) für ein Sprachsignal. Rechts: Relative Häufigkeit der PPM-Werte und Pegelperzentile L50, L75 und L95

Analysedauer von mindestens 3 s erforderlich. Dieses am Institut für Rundfunktechnik (IRT) entwickelte und als „IRT Lautheit“ bezeichnete Verfahren ist in einigen Aussteuerungsmessern (Pinguin Audio Meter Software) implementiert, konnte sich im Rahmen der internationalen Standardisierung durch die ITU (s.u.) aber nicht durchsetzen.

Zwicker-Modelle

Einige inzwischen auch als Echtzeit-Implementierungen vorliegende Verfahren (Hansen 1996) beruhen auf dem Zwickerschen Lautheitsmodell (Kap. 2.2.4.3) und summieren die in einzelnen Frequenzgruppen bestimmten Teillautheiten zu einer Gesamtlautheit, die Maskierungseffekte zwischen den Frequenzbändern berücksichtigt. Während das Zwicker-Verfahren ursprünglich nur für stationäre Signale vorgesehen war, berücksichtigen neuere Algorithmen, die zum Teil FFT-basiert, zum Teil Filterbank-basiert arbeiten, auch Vor- und Nachverdeckungseffekte (Skovborg u. Nielsen 2004), wie sie bei impulshaftem Audiomaterial von Bedeutung sind.

Lautheitsmessung bei mehrkanaligem Audiomaterial nach ITU-R BS.1770

Insbesondere beim Rundfunk (Hörfunk und Fernsehen) ist die Lautheitsanpassung ein vordringliches Problem, da Lautheitssprünge zwischen verschiedenen Sendern, aber auch innerhalb eines Senders zwischen verschiedenem Programmmaterial (Wort/Musik), oder bei eingeschobenen, durch starke Kompression bereits lautheitsmaximierten Werbeblöcken, von den Hörern als besonders störend empfunden werden. Eine von der International Telecommunication Union (ITU) im Jahr 2002 eingesetzte Arbeitsgruppe führte daher eine Reihe von Hörversuchen zur Korrela-

tion von empfundener Lautheit mit einer Auswahl verschiedener technischer Lautheitsmaße durch, wobei typisches Programmmaterial im Rundfunk (Sprache, Musik) als Teststimulus diente (Soulodre 2004). Hierbei ergab sich eine maximale Übereinstimmung zwischen perceptiv und technisch bestimmter Lautheit für eine L_{eq} -Messung mit einer Frequenzbewertung anhand einer sog. RLB-Kurve (für *revised low-frequency B-curve*, Abb. 10.8). Überraschenderweise lieferten die in der Berechnung weitaus komplexeren Zwicker-Modelle hier die schlechteste Übereinstimmung. In der 2006 veröffentlichten Empfehlung ITU-R BS.1770 kommt daher eine L_{eq} (RLB)-Messung zu Einsatz. Bei der Lautheitsberechnung mehrkanaliger Signale werden die Kanalsignale mit einem Vorfilter beaufschlagt, das eine am Frequenzgang des Schalldrucks auf der Oberfläche einer schallharten Kugel (als Modell für den Kopf des Hörers) orientierte Frequenzbewertung des einfallenden Schalls vornimmt (Abb. 10.8, vgl. Abb. 7.23).

Für die durch beide Filterkurven bewerteten Kanalsignale y_i wird analog zu (10.1) ein quadratischer Mittelwert z_i gebildet mit

$$z_i = \frac{1}{T} \int_0^T y_i^2 dt \tag{10.2}$$

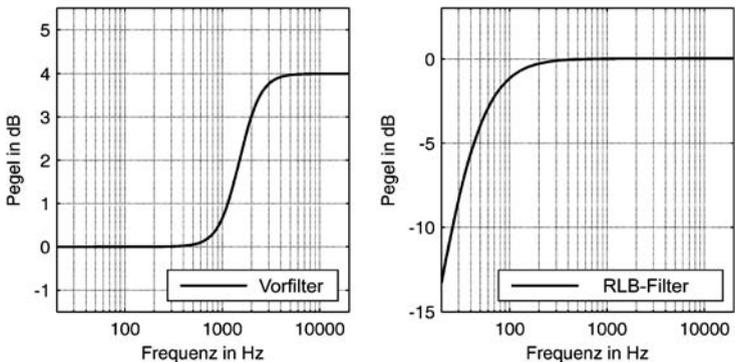
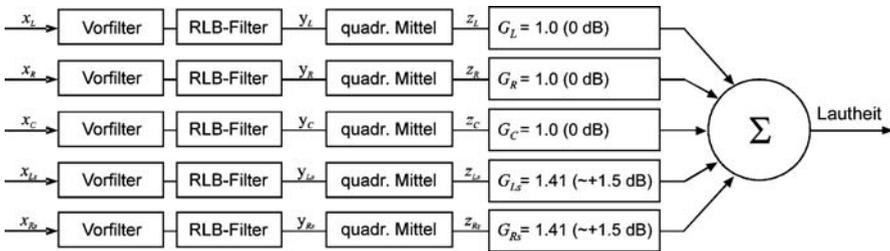


Abb. 10.8: Oben: Flussdiagramm für den Lautheitsalgorithmus nach ITU-R BS.1770 mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren G_i für die Frontkanäle (L, R, C) und die Surroundkanäle (LS, RS). Unten: Frequenzbewertung durch das Vorfilter und das RLB-Filter

Die Gesamtlautheit wird als Leistungssumme der Einzelkanäle berechnet, wobei die Surround-Kanäle um den Faktor 1,41 (+1,5 dB) höher bewertet werden, da rückwärtig einfallender Schall, vor allem im für Sprache wichtigen mittleren Frequenzbereich, im Mittel lauter wahrgenommen wird als frontal einfallender Schall (vgl. Abb. 1.8 und Abb. 2.9). Die Gesamtlautheit ergibt sich somit durch

$$\text{Lautheit} = -0,691 + 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N G_i \cdot z_i \quad (10.3)$$

Die Konstante von $-0,691$ dB wurde so gewählt, dass ein 1 kHz-Sinussignal auf einem der drei Frontkanäle zu einer Lautheit von -3 dB führt. Auch wenn die so berechneten Lautheitswerte insgesamt sehr hoch mit den von Versuchspersonen angegebenen Lautheiten korrelieren, können für bestimmte Programminhalte immer noch Abweichungen von bis zu 5 dB auftreten (Abb. 10.9). Es bleibt daher abzuwarten, inwieweit dieses, durch ein digitales IIR-Filter 2. Ordnung für die Frequenzbewertung leicht zu implementierende Verfahren in Hörfunk und Fernsehen in Zukunft zu einer ausgeglicheneren Lautheit beitragen kann.

Auch in der Tonträgerproduktion wird bei Kompilationen von unterschiedlichem Material meist auf ausgeglichene Lautheit geachtet: Das Medium (die CD, DVD) insgesamt wird zwar vollausgesteuert, nicht aber jeder einzelne Titel. Allerdings ist die Firmenphilosophie hier nicht einheitlich und man findet bei Programmmaterial mit hoher Lautheit (Cembalo) vereinzelt auch ganze Tonträger unter Vollaussteuerung.

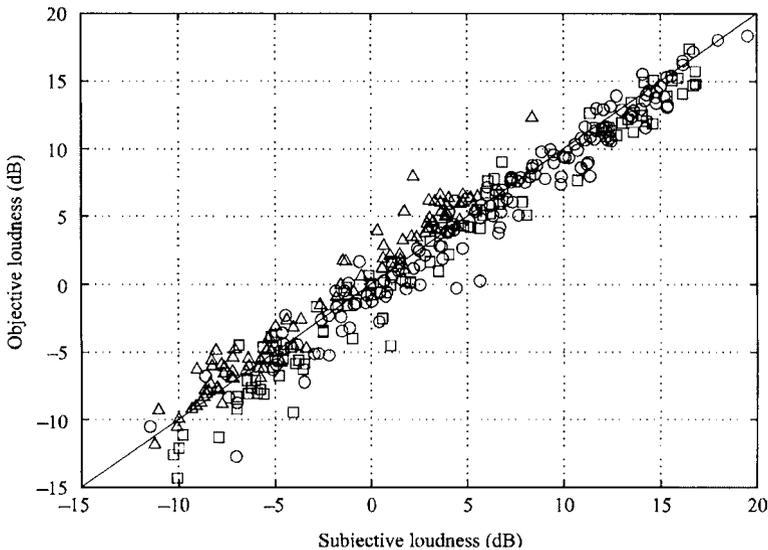


Abb. 10.9 Korrelation von im Hörversuch bestimmter Lautheit mit technisch ermittelter Lautheit nach dem L_{eq} (RLB)-Verfahren für verschiedene Datensätze (verschiedene Symbole) mit monofonem, stereofonem und mehrkanaligem Audiomaterial und typischen Rundfunk-Programminhalten, nach (Soulodre 2004)

10.1.2 Korrelation und Polarität

10.1.2.1 Korrelationsgradmesser

Die *Korrelation* wird in der Statistik ebenso wie bei der Beschreibung von statistischen Signalen als Maß für die Ähnlichkeit zweier Signale benutzt (Girod et al. 2003). In der Audiotechnik ist allerdings häufig nicht eindeutig definiert, was gemeint ist, wenn von *korrelierten* oder *unkorrelierten* (auch: *dekorrelierten*) Signalen die Rede ist. Die Anzeige des als Kontrollinstrument verbreiteten Korrelationsgradmessers lässt sich als normierte Kurzzeit-Kreuzkorrelation zwischen linkem und rechtem Kanal eines Stereosignals interpretieren. Dabei gilt

$$r = \frac{\int_0^T x_L x_R dt}{\sqrt{\int_0^T x_L^2 dt \int_0^T x_R^2 dt}} \tag{10.4}$$

x_L : Signal linker Kanal
 x_R : Signal rechter Kanal

Die Werte für den Korrelationsgrad r liegen somit zwischen -1 und $+1$. Für identische Signale x_L und x_R ist $r = 1$, für identische Signale mit vertauschter Polarität (gegenphasige Signale) ist $r = -1$. Die schaltungstechnische Realisierung des Korrelationsgradmessers hat sich seit seiner Einführung in der Frühzeit stereofoner Übertragung kaum verändert (Ribbeck u. Schwarze 1965). Ein Prinzipschaltbild zeigt Abb. 10.10. Um eine vom Signalpegel unabhängige Anzeige zu erhalten, werden beide Kanäle stark limitiert, sodass Pegelschwankungen zwischen -30 dB und $+10$ dB ohne Einfluss auf die Anzeige bleiben. Ein Ringmodulator multipliziert die vom Begrenzer gelieferten Rechtecksignale.

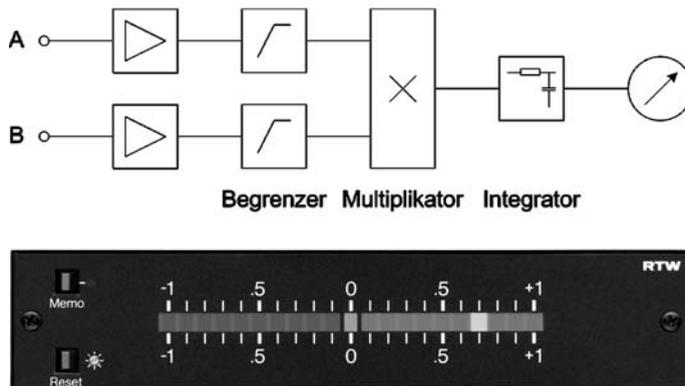


Abb. 10.10 Korrelationsgradmesser: Prinzipschaltbild (oben) und Anzeige (unten, © RTW Köln)

Für stark limiterte und damit annähernd rechteckförmige Signale ist der Korrelationsgrad somit nichts anderes als ein Maß für die mittlere Polaritätsbeziehung der Signale, d. h.

$$r = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \quad (10.5)$$

T_1 : Zeit, in der x_L und x_R gleiches Vorzeichen haben

T_2 : Zeit, in der x_L und x_R ungleiches Vorzeichen haben

Wenn x_L und x_R stets gleiche Polarität aufweisen, ist $r = 1$, für stets ungleiche Polarität ist $r = -1$. Für unkorrelierte Signale mit zufälliger Polaritätsbeziehung ist $r = 0$. Die Integrationszeit T wird schaltungstechnisch auf Werte zwischen 0,5 und 1 s eingestellt, um ein ruhiges Bewegungsbild des Korrelationsgradmessers zu erreichen. Digitale Korrelationsgradmesser simulieren durch einen geeigneten Algorithmus das Verhalten der analogen Schaltung, um eine konsistente Anzeige zu gewährleisten.

Für sinusförmige Signale, allerdings nur für diese, gibt r den Cosinus der Phasendifferenz φ zwischen linkem und rechtem Kanal an, d. h.

$$r = \cos \varphi \quad (10.6)$$

Hier entspricht $r = 1$ einer Phasendifferenz von 0° , $r = 0$ einer Phasendifferenz von 90° und $r = -1$ einer Phasendifferenz von 180° . Für Audiosignale mit statistischem Charakter hat die aus (10.6) abgeleitete, stationäre Phasendifferenz allerdings keine Bedeutung.

In der Frühzeit der Stereophonie und in der Schallplattenfertigung war eine Anzeige der Polarität unverzichtbar, da tieffrequente gegenphasige Signale auf einer LP einen unzulässig tiefen Rillenschnitt erzeugt hätten. Beim Rundfunk wurde aus Gründen der Mono-Kompatibilität überwiegend mit koinzidenten Aufnahmeverfahren gearbeitet. Hier ergibt sich für Einzelschallquellen stets ein Korrelationsgrad von $r = 1$, da die Pegelunterschiede zwischen den Kanälen durch den Begrenzer ausgeglichen werden, und das Signal phasengleich auf beiden Kanälen vorliegt. Zwei Schallquellen, von denen eine überwiegend auf dem linken, die andere überwiegend auf dem rechten Kanal repräsentiert ist, liefern ein weitgehend unkorreliertes Signal mit $r = 0 \dots 1$. Ein Wert von $r < 0$ war somit stets ein Warnsignal, da es entweder eine elektrische Verpolung eines Kanals angezeigt hat oder eine Schallquelle, die sich im gegenphasigen Bereich eines Mikrofons (etwa im rückwärtigen Teil eines Achter-Mikrofons) befindet. Stereosignale mit stark gegenphasigen Anteilen sind nur eingeschränkt monokompatibel, da bei der Addition beider Kanäle, die zur Bildung eines Monosignals notwendig ist, frequenzabhängige Auslöschungen auftreten, die als kammfilterartige Verzerrungen vor allem im tieffrequenten Bereich deutlich hörbar sein können. Im Bereich von Rundfunk und Fernsehen, wo mit einer großen Zahl monofoner Wiedergabegeräte gerechnet werden

muss, wird auch heute noch darauf geachtet, dass der Korrelationsgrad nicht über längere Passagen im negativen Bereich liegt. In der Tonträgerproduktion hat die Anzeige an Bedeutung verloren.

10.1.2.2 Vektorskop

Eine Anzeige der Polaritätsbeziehung von Stereosignalen gewinnt man auch durch das *Vektorskop* (auch *Stereosichtgerät* oder *Goniometer*). Dabei handelt es sich um ein um 45° gedrehtes Oszilloskop, bei der ein Signal mit positiver Polarität im linken Kanal eine Auslenkung nach links oben, ein Signal mit positiver Polarität im rechten Kanal eine Auslenkung nach rechts oben bewirkt. Die Position des Leuchtpunkts ergibt sich somit als Vektoraddition der beiden Kanalsignale. Aufgrund der Nachleuchtzeit der Anzeige (bei älteren Geräten ein Kathodenstrahlschirm, bei neueren Geräten ein TFT-Display) werden Wechselspannungen als geschlossene Linien um oder durch den Ursprung abgebildet. Stereosignale mit überwiegend gleicher

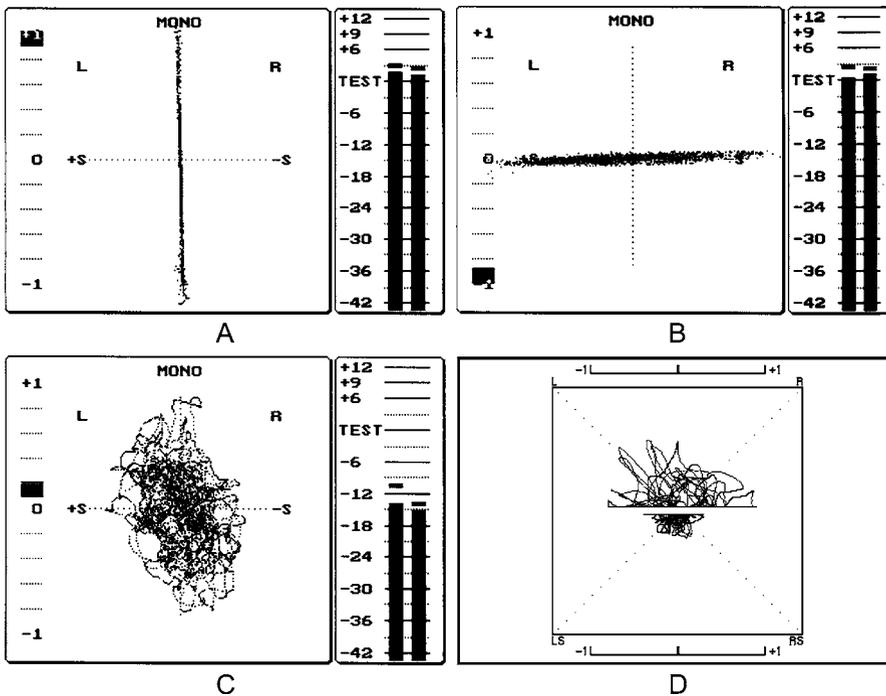
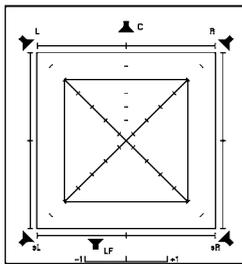


Abb. 10.11 Anzeigen eines zweikanaligen (A–C) und eines vierkanaligen (D) Vektorskops
 A: Zwei identische Signale (Mono)
 B: Zwei identische Signale mit ungleicher Polarität
 C: Stereosignal mit überwiegend gleichphasigen Anteilen (monokompatibel)
 D: Vierkanaliges Vektorskop mit geteilter Anzeige für Front- und Surroundkanäle
 (© DK-Audio A/S, RTW Köln)

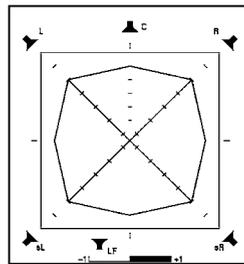
Polarität erscheinen zur vertikalen Mittelachse hin zentriert, Stereosignale mit überwiegend gegensätzlicher Polarität erscheinen zur Horizontalachse zentriert. Zur Anzeige der Polaritätsbeziehung vierkanaliger Signale kann jeweils eine Hälfte der Anzeige abgeschnitten werden, da die meisten Audiosignale symmetrische Wellenformen besitzen und somit jeweils eine Hälfte der Anzeige redundant ist (Abb. 10.11).

10.1.2.3 Surround-Sichtgeräte

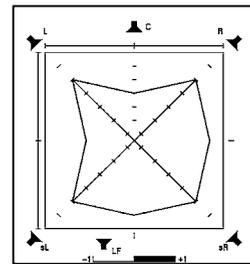
Eine kombinierte Darstellung von Signalpegel und Korrelationen für mehrkanalige Signale liefert ein Surround-Sound-Analyzer (Abb. 10.12). Aus der Form eines Vielecks, an dessen Ecken die Wiedergabekanal liegen, kann man die Pegel der einzelnen Kanäle und die Korrelationen zwischen benachbarten Kanälen ablesen. Der Abstand der Eckpunkte vom Ursprung gibt den Signalpegel des Kanals an. Die Form der Verbindungslinie zwischen den Kanälen zeigt den Korrelationsgrad an: Eine gerade Linie steht für eine Korrelation von 0, eine nach außen geknickte Linie für eine positive und eine nach innen geknickte Linie für eine negative Korrelation.



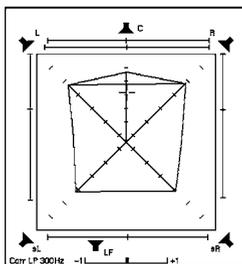
Inkohärentes Rauschen, gleicher Pegel in den Kanälen L, R, sL und sR



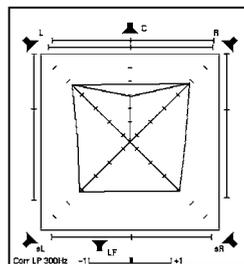
Sinus-Signal, gleicher Pegel in den Kanälen L, R, sL und sR, ähnlich einem Mono-Signal



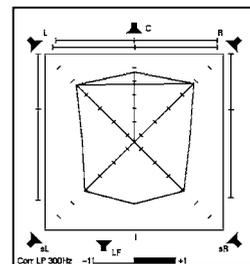
Wie links, jedoch ist die Phase des linken Kanals um 180° gedreht



Surround-Signal mit etwas Center-Präsenz



Surround-Signal mit geringer Center-Präsenz



Surround-Signal, zwischen sL und sR ist mono

Abb. 10.12 Darstellung verschiedener Signalbeziehungen (Pegel, Korrelation) für vierkanalige (oben) und fünfkanalige (unten) Signale mit einem Surround-Sound-Analyzer (© RTW Köln)

10.2 Monofone Aufnahme

Der Begriff *monofone Aufnahme* steht für die einkanalige Kodierung von Schallquellen, d. h. für eine Aufnahme, bei der Schallquellen ausschließlich oder ganz überwiegend einkanalig (d. h. in der Regel: mit einem Mikrofon) aufgenommen werden. Dies sagt noch nichts über das nachgeordnete Wiedergabeverfahren aus. Eine monofone Aufnahme kann stereofon wiedergegeben werden, etwa durch Zuordnung zu mehreren Wiedergabekanälen mit dem Panorama-Potentiometer, ebenso kann eine stereofone Aufnahme monofon wiedergegeben werden. Bei stereofonen Aufnahmen werden die Laufzeit- und Pegeldifferenzen zwischen mehreren Mikrofonen bzw. mehreren Kanälen bewusst zur Kodierung der räumlichen Eigenschaften der Schallquelle eingesetzt. Bei monofonen Aufnahmen dagegen ist jeder Schallquelle zunächst ein Mikrofon bzw. ein Übertragungskanal zugeordnet; die Klangbalance und die räumliche Abbildung erfolgt bei der Mischung. Als Freiheitsgrade bei der Aufnahme stehen somit neben der Auswahl des Mikrofon-Typs mit dem ihm eigenen richtungsabhängigen Frequenzgang nur sein Abstand und seine Ausrichtung relativ zur Schallquelle zur Verfügung. Bei überwiegend jeweils monofoner Aufnahme von mehreren Schallquellen spricht man auch von *Einzelmikrofonie* oder *Polymikrofonie*.

10.2.1 Mikrofonabstand

Der Abstand zwischen Schallquelle und Mikrofon ist ein wichtiges Element der Klanggestaltung bei der Aufnahme. Bei Schallquellen mit allseitiger Abstrahlung – die meisten natürlichen, akustischen Quellen wie Musikinstrumente oder Sprecher können näherungsweise so behandelt werden – nimmt der Freifeldanteil im Schallfeld (Direktschall) mit 6 dB pro Entfernungsverdopplung ab. Mit zunehmender Entfernung von einer Schallquelle im Raum liefert somit der im idealisierten Schallfeld eines Raums überall gleiche Diffusfeldpegel einen zunehmenden und jenseits des Hallabstands einen dominierenden Beitrag zum Schallfeld der Quelle (Abb. 5.1). Damit ändert sich nicht nur die Räumlichkeit des vom Mikrofon aufgenommenen Klangbilds sondern auch die Klangfarbe. Der Frequenzgang einer im Diffusfeld aufgenommenen Schallquelle weist aus drei Gründen eine Höhendämpfung auf. Zum einen führt die Luftabsorption, die bei Frequenzen oberhalb von 8 kHz eine Dämpfung von etwa 10 dB für einen Laufweg von 100 m bewirkt (ISO 9613-1), zu einer Höhendämpfung der mehrfach reflektierten, diffusen Schallanteile im Raum. Zum anderen bewirkt auch die bei Reflexionen wirksame Absorption der Wände meist eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Höhendämpfung. Und schließlich erreichen diffuse Schallanteile das aufnehmende Mikrofon aus Einfallrichtungen, für die es aufgrund seines richtungsabhängigen Frequenzgangs eine empfangsseitige Dämpfung hoher Frequenzanteile aufweist. Alle Faktoren gemeinsam bewirken in der Regel eine mit dem Abstand von der Schallquelle zunehmende

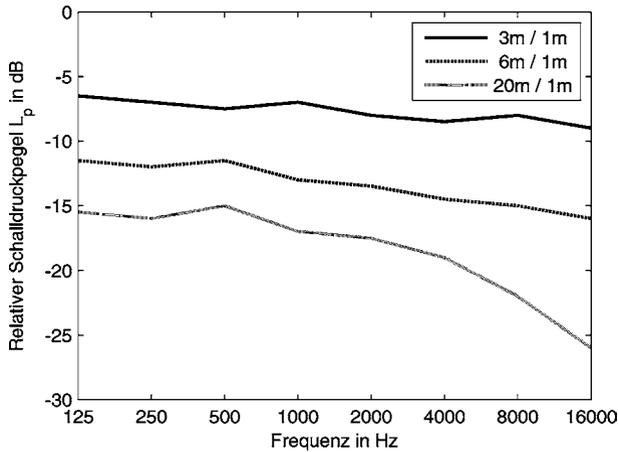


Abb. 10.13 Raumübertragungsfunktion (Betragsfrequenzgang) für verschiedene Abstände (3 m, 6 m, 20 m) zwischen Quelle (Lautsprecher) und Empfänger (Mikrofon), jeweils bezogen auf den Verlauf in 1 m Entfernung und in Oktavbändern gemittelt. Gemessen im Audimax der TU Berlin ($V = 8700 \text{ m}^3$, $T_{\text{mid}} = 2 \text{ s}$, Hallabstand für die verwendete Quelle: $r_H \approx 6 \text{ m}$, Raummodell s. Abb. 1.9)

Höhendämpfung für den am Mikrofon wirksamen Frequenzgang einer Schallquelle im Raum (Abb. 10.13).

Dieser Höhendämpfung für diffuse Schallanteile kann durch die Verwendung von diffusfeldentzerrten Druckempfängern mit einer typischen Anhebung von 6–8 dB im Bereich von 8–10 kHz entgegengewirkt werden, oder durch eine elektrische Entzerrung des Signals, die den Höhenabfall kompensiert.

Eine weitere spektrale Besonderheit tritt in unmittelbarer Nähe von Schallquellen auf, allerdings nur bei Mikrofonen, die als Gradienten- oder Schnelleempfänger wirken. Hier führt die überproportionale Zunahme des Druckgradienten bzw. der Schallschnelle im Nahfeld von Schallquellen mit allseitiger Abstrahlung zu einer Anhebung tiefer Frequenzen (vgl. Abb. 1.18 und Abb. 7.21). Die durch diesen sog. Nahbesprechungseffekt bedingte Betonung tiefer Frequenzanteile wird vor allem in der Populärmusik häufig bewusst eingesetzt, um das klangfarbliche „Volumen“ und die sonoren Klanganteile insbesondere bei weiblichen Gesangsstimmen zu betonen. Soll diese Überbetonung tiefer Frequenzanteile vermieden werden, muss bei geringen Mikrofonabständen mit einer elektrischen Bassabsenkung entzerrt werden.

10.2.2 Ausrichtung

Nicht nur der Abstand, auch die Ausrichtung eines Mikrofons relativ zur Schallquelle hat Einfluss auf die spektrale Verteilung des aufgenommenen Signals. Unabhängig vom Empfängertyp weisen alle Mikrofone eine mehr oder weniger stark zunehmende Richtwirkung zu hohen Frequenzen auf. Dies ist gleichbedeutend mit der Tatsache,

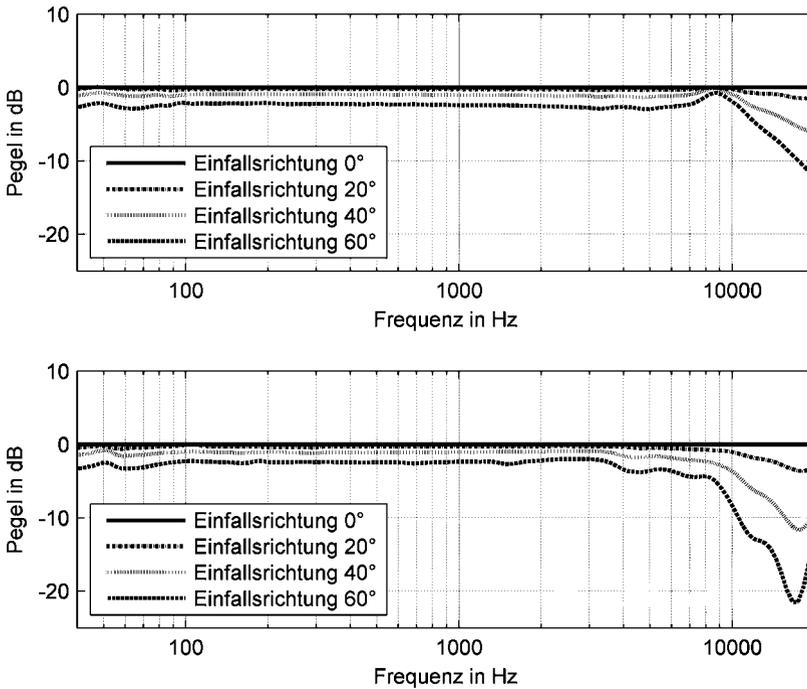


Abb. 10.14 Freifeld-Frequenzgang eines Kleinmembranmikrofons (Neumann KM 184, oben) und eines Großmembranmikrofons (Neumann TLM 103, unten) für unterschiedliche Schalleinfallrichtungen, bezogen auf das Übertragungsmaß in der 0°-Achse

dass der Frequenzgang eines Mikrofons bei nicht frontalem Schalleinfall einen Höhenabfall aufweist, der umso stärker ist, je mehr die Schalleinfallrichtung von der Mikrofonhauptachse (0°-Richtung) abweicht. Der Höhenabfall ist umso ausgeprägter und setzt umso früher ein, je größer die Mikrofon-Membran ist (Abb. 10.14).

Einerseits erschwert dieser richtungsabhängige Verlauf des Frequenzgangs die klangfarblich ausgewogene Abbildung ausgedehnter Klangkörper, andererseits kann er auch zur Ausbalancierung der klangfarblichen Präsenz einzelner Klangquellen durch die Ausrichtung des Mikrofons eingesetzt werden. Allgemein produzieren Großmembranmikrofone stärkere Verfärbungen im diffusen Schallfeld (s. Abb. 10.14) und werden daher überwiegend zur Direktabnahme von einzelnen Schallquellen eingesetzt.

10.3 Zweikanalstereofone Aufnahmen

Schallquellen werden stereofon aufgenommen, um ausgedehnte Klangkörper bei der Wiedergabe nicht punktförmig, sondern mit einer gewissen Abbildungsbreite erscheinen zu lassen. Dies wird erreicht, indem die Quelle in Abhängigkeit von

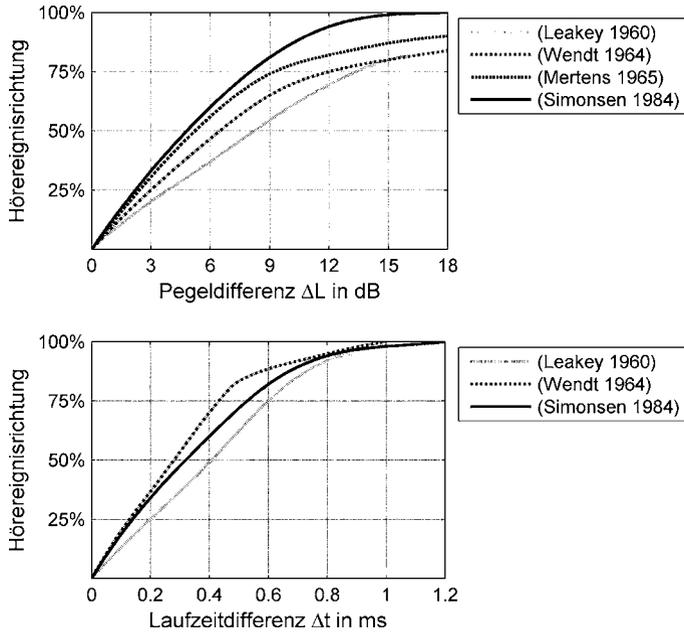


Abb. 10.15 Lokalisation von Phantomschallquellen auf der Lautsprecherbasis (s. Abb. 13.5) in Abhängigkeit von Pegel- und Laufzeitdifferenzen stereofoner Signale auf der Grundlage von Hörversuchen mit verschiedenen Teststimuli: Sprache (Leakey 1960, Simonsen 1984), rechteckförmig geschaltete Knacke (Wendt 1964) sowie Gaußpulse und Terzbandrauschen (Mertens 1965)

ihrer Position zum stereofonen Mikrofonsystem mit Laufzeit und/oder Pegelunterschieden in den beiden Kanälen kodiert wird, die sie bei der Wiedergabe als Phantomschallquelle zwischen den Lautsprechern erscheinen lassen. Je nach der Art dieser Kodierung unterscheidet man *Intensitätsstereofonie* (nur Pegeldifferenzen), *Laufzeitstereofonie* (nur Laufzeitdifferenzen) und *Äquivalenzstereofonie* bzw. *gemischte Verfahren* (Laufzeit- und Pegeldifferenzen). Ein Sonderfall ist die *Trennkörperstereofonie*, bei der durch einen Trennkörper zwischen den Mikrofonen frequenzabhängige Pegeldifferenzen erzeugt werden. Das Gleiche trifft für binaurale Aufnahmen zu (*Kunstkopfstereofonie*), deren Signale allerdings nicht für Lautsprecher- sondern für Kopfhörerwiedergabe optimiert sind.

Die Position stereofon aufgenommener Schallquellen bei der Wiedergabe ergibt sich aus den Lokalisationskurven für Phantomschallquellen in Abhängigkeit von der stereofonen Pegel- bzw. Laufzeitdifferenz. Der Verlauf dieser zum ersten Mal von de Boer (1940) durch Hörversuche empirisch bestimmten Kurven hängt stark von den im Versuch benutzten Quellsignalen (Rauschen, Sinustöne, Sprache, Musik) ab, außerdem von der Tatsache, ob die Versuche mit fixiertem Kopf oder mit frei beweglichem Kopf durchgeführt werden. Eine Zusammenstellung verschiedener Daten zeigt Abb. 10.15. Bis zu einer seitlichen Auslenkung der Phantomschallquelle von 75% auf der Lautsprecherbasis ist der Zusammenhang zwischen Pegel- und Laufzeitdifferenz und Auslenkung weitgehend linear (s.a. Wittek u.

Theile 2002), zu größeren Auslenkungen flacht er zunehmend ab. Als Näherungswerte aus Abb. 10.15 für verschiedene Quellsignale und Versuchsreihen können die Werte in Tabelle 10.3 benutzt werden.

Tabelle 10.3 Faustregel für die Konfiguration stereofoner Aufnahmesysteme. Angegeben ist die Hörereignisrichtung auf der Lautsprecherbasis zwischen Mitte (0%) und dem Ort des Lautsprechers (100%) in Abhängigkeit von Pegel und Laufzeitunterschieden (vgl. Daten in Abb. 10.15)

Hörereignisrichtung	0%	25%	50%	75%	100%
ΔL [dB]	0	3	6.5	10	16
Δt [ms]	0	0.2	0.4	0.6	1.2

Aus diesen Werten ergeben sich die Abbildungseigenschaften stereofoner Mikrofonanordnungen in Abhängigkeit von ihrer Geometrie, d. h. von Abstand, Ausrichtung und Richtcharakteristik der Mikrofone. Am Beispiel einer ORTF-Anordnung von zwei Mikrofonen mit Nierencharakteristik soll die dabei verwendete Terminologie nach DIN EN 60268-4 erläutert werden.

Als *Hauptachsenwinkel* wird der Winkel zwischen den Bezugsachsen (0° -Achsen) der beiden Mikrofone bezeichnet. Als *Akzeptanzwinkel* wird der Winkel zwischen den Richtungen der größten Pegeldifferenz zwischen linkem und rechtem Mikrofonsignal bezeichnet. In der Regel ist dies der Winkel zwischen den Richtungen minimaler Empfindlichkeit für eines der beiden Mikrofone, im obigen Beispiel der Auslöschwinkel der beiden Nieren. Jenseits des Akzeptanzwinkels nimmt die Pegeldifferenz, mit der die Quelle kodiert wird, wieder ab, wodurch sie bei der Wiedergabe in die Mitte rückt. Als *Aufnahmewinkel* wird der Winkel zwischen den Schalleinfallrichtungen bezeichnet, die eine Lokalisation der Quelle ganz links bzw. ganz rechts ermöglichen. Nach den Werten in Tabelle 10.3 wären dies die Einfallrichtungen, in denen ein Pegelunterschied von etwa 16 dB oder ein Laufzeitunterschied von etwa 1,2 ms entsteht. Der Aufnahmewinkel ist stets kleiner als der Akzeptanzwinkel. Hauptachsenwinkel und Aufnahmewinkel verhalten sich gegenläufig, d. h. eine Vergrößerung des Hauptachsenwinkels bewirkt eine Verkleinerung des Aufnahmewinkels.

Der Aufnahmewinkel hat insofern praktische Bedeutung, als bei der Aufnahme nur Schallquellen oder Gruppen von Quellen, die den ganzen Aufnahmewinkel ausfüllen, bei der Wiedergabe das ganze Stereopanorama zwischen den Lautsprechern ausfüllen. Nimmt der Klangkörper nur einen Teil des Aufnahmewinkels ein, wird er bei der Wiedergabe entsprechend schmaler abgebildet. Alle Schallquellen, die sich jenseits des durch den Aufnahmewinkel eingegrenzten Bereichs befinden, werden bei der Wiedergabe – räumlich komprimiert – am Ort des rechten bzw. linken Lautsprechers abgebildet. Einen systematischen Überblick über die Eigenschaften zweikanalstereofoner Aufnahmeverfahren findet man bei (Williams 1987).

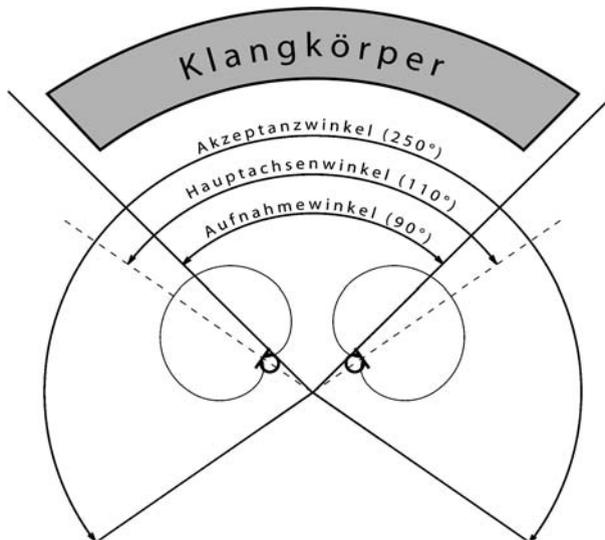


Abb. 10.16 Geometrie und Abbildungseigenschaften stereofoner Mikrofonanordnungen: Hauptachsenwinkel, Akzeptanzwinkel und Aufnahmewinkel

10.3.1 Intensitätsstereofonie

Als Intensitätsstereofonie werden alle Aufnahmeverfahren bezeichnet, bei denen sich linker und rechter Kanal nur im Pegel, nicht aber in Laufzeit bzw. Phasenlage der Signale unterscheiden. Eine Quelle, die auf dem rechten Kanal lauter als auf dem linken ist, wird auf der Stereobasis rechts lokalisiert. Intensitätsstereofone Aufnahmen können mit einer *XY-Anordnung* oder einer *MS-Anordnung* hergestellt werden. Beide Anordnungen werden auch als *Koinzidenzverfahren* bezeichnet, da Schallwellen beliebiger Einfallsrichtung (annähernd) zeit- und phasengleich auf dem rechten und linken Kanal aufgenommen werden.

10.3.1.1 XY-Verfahren

XY-Anordnungen bestehen aus zwei gerichteten Kapseln mit gleicher Richtcharakteristik, die idealerweise am selben Ort angeordnet und um den Hauptachsenwinkel α gegeneinander angewinkelt sind (Abb. 10.17). In der Praxis werden sie unmittelbar übereinander montiert, um zumindest für Schallquellen in der Horizontalebene Koinzidenz herzustellen. Für Aufnahmen in XY-Technik werden entweder spezielle Stereomikrofone verwendet, bei denen zwei Kapseln in einem Gehäuse übereinander montiert sind oder separate Mikrofone, die auf einer Schiene angewinkelt montiert werden. (Abb. 10.18).

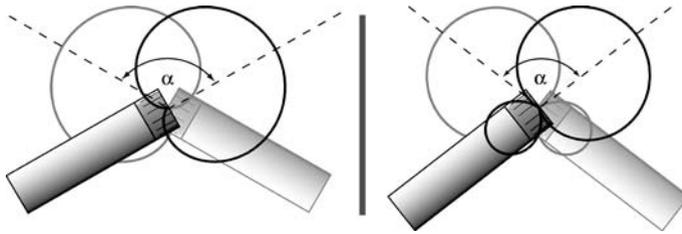


Abb. 10.17 XY-Stereofonie mit Nieren (links) und Supernieren (rechts) und einem Hauptachsenwinkel α

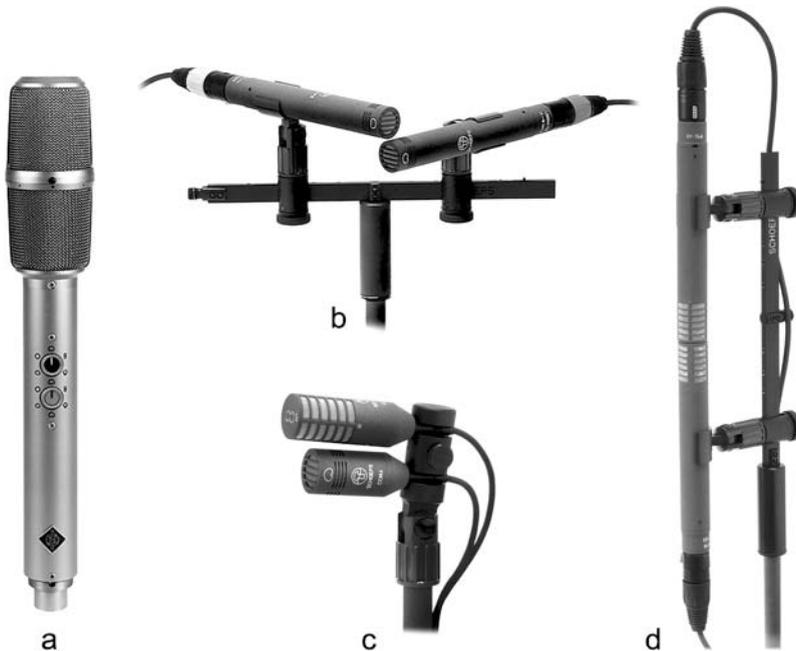


Abb. 10.18 Varianten der Intensitätsstereofonie: a: Koinzidenzmikrofon aus zwei drehbaren Kapseln mit einstellbarer Richtcharakteristik, b: XY mit gekreuzten Nierenmikrofonen, c: MS-Anordnung mit Niere und Acht, d: Blumlein-Verfahren mit gekreuzten Achtermikrofonen (Fotos: Fa. Schoeps Mikrofone, Georg Neumann GmbH)

Legt man die Lokalisationswerte aus Tabelle 10.3 zugrunde, so ergeben sich für verschiedene Richtcharakteristiken und Hauptachsenwinkel die in Abb. 10.19 berechneten Aufnahmewinkel.

In Abhängigkeit von Richtcharakteristik und Hauptachsenwinkel ergibt sich auch die Balance, mit der frontale und seitliche Schallquellen übertragen werden. Nur für eine Dämpfung von frontal, d.h. aus der Symmetrieachse der Anordnung einfallenden Quellen um 3 dB auf beiden Kanälen erscheinen diese bei stereofoner Wiedergabe gleich laut wie Quellen in der Hauptachse der Einzelmikrofone.

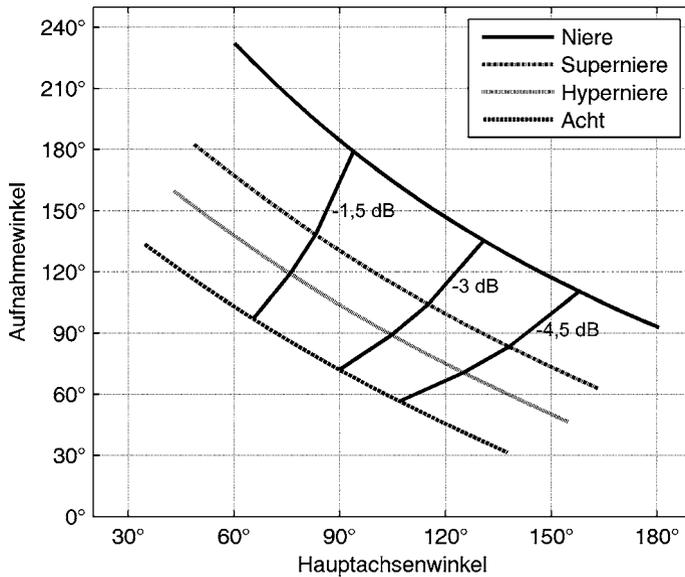


Abb. 10.19 XY-Verfahren. Aufnahmewinkel für verschiedene Hauptachsenwinkel und Richtcharakteristiken. Entlang der -3 dB-Linie werden frontale Schallquellen von beiden Mikrofonen um 3 dB gedämpft aufgenommen und erscheinen somit in der Summe der Lautsprechersignale mit gleicher Intensität wie seitliche Schallquellen. Zu kleineren Hauptachsenwinkeln hin erscheinen frontale Schallquellen überbetont ($-1,5$ dB-Linie), zu größeren Hauptachsenwinkeln unterbetont ($-4,5$ dB-Linie).

Ein Spezialfall der XY-Stereofonie, zwei gekreuzte Achten mit einem Achsenwinkel von 90° , wird als *Blumlein-Verfahren* bezeichnet, benannt nach dem Ingenieur Alan Blumlein, der bereits in den 1930er Jahren mit stereofoner Aufzeichnung experimentierte und dieses Verfahren patentieren ließ (Blumlein 1931, Alexander 1999, Burns 2000, s. Kap. 3.3.4.1).

10.3.1.2 MS-Verfahren

Bei *MS-Verfahren* werden im Gegensatz zu XY-Systemen zwei Mikrofone mit verschiedenen Richtcharakteristiken senkrecht übereinander montiert: Ein seitlich ausgerichtetes Achtermikrofon zur Erzeugung eines Seitensignals (S) und ein nach vorne zeigendes Mikrofon für das Mittensignal (M) (Abb. 10.20). Das M-Mikrofon kann im Prinzip beliebige Richtcharakteristik haben.

Vor der Wiedergabe wird das MS-Signal durch Summen- und Differenzbildung in ein XY-Signal umgewandelt. Wenn man das XY- und MS-Signalpaar auf gleiche Signalleistung normiert, gilt:

$$X = \frac{1}{\sqrt{2}}(M + S) \quad (10.7)$$

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2}}(M - S) \tag{10.8}$$

Die Summen- und Differenzbildung kann durch eine passive Differentialübertrager-Schaltung oder eine aktive Summen-/Differenzverstärkerschaltung erfolgen (Kap. 7.6.6. und Görne 2004:108f.), die häufig als Teil eines *MS-Richtungsmischers* in Mischpulten integriert sind. Sie kann jedoch auch „von Hand“ durch Phasenumkehr und Addition im Mischpult erfolgen. Durch die Summen- und Differenzbildung der Signale entsteht eine effektive Richtcharakteristik, wie sie auch durch ein XY-System erzielt werden könnte (Abb. 10.21).

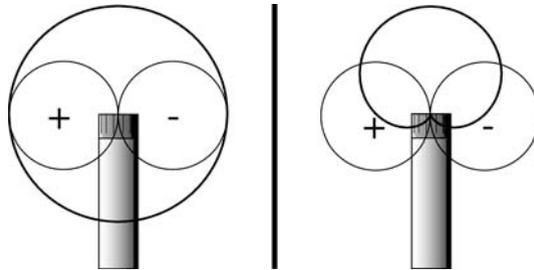


Abb. 10.20 MS-Anordnung mit Kugel (links) und mit Niere (rechts) als Mittensignal

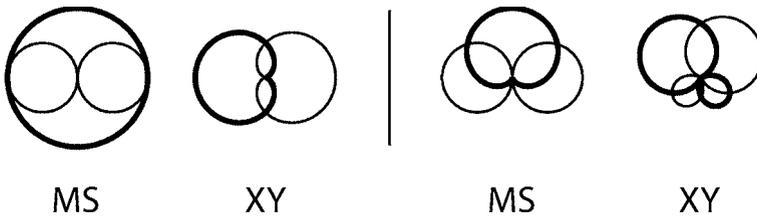


Abb. 10.21 Äquivalente XY-Anordnung für ein MS-Paar mit Kugel und Acht (links) und Niere und Acht (rechts) mit jeweils gleichem Signalpegel

In Abhängigkeit von der für das M-Signal verwendeten Richtcharakteristik und dem Mischungsverhältnis zwischen M und S ergeben sich Stereo-Aufnahmewinkel nach Abb. 10.22.

Für Aufnahmen in MS-Anordnung können wie bei XY integrierte Koinzidenzmikrofone oder zwei übereinander montierte Einzelmikrofone verwendet werden. Obwohl die Summen- und Differenzbildung nach (10.7) und (10.8) mathematisch auf eine idealisierte Richtcharakteristik führt, wie sie auch mit XY-Mikrofonen erreichbar wäre, gibt es einige Unterschiede zwischen MS- und XY-Systemen. Zum einen verändert sich die Richtwirkung von Achter-Mikrofonen zu höheren Frequenzen weniger stark als die von Kugel- und Nierenmikrofonen. MS-Systeme weisen also eine insgesamt stabilere Richtwirkung auf, somit bleibt auch der Aufnahmewinkel über den ganzen Frequenzbereich weitgehend konstant. Zum anderen besteht die Möglichkeit, den Richtungsmischer erst bei der Mischung zu verwenden

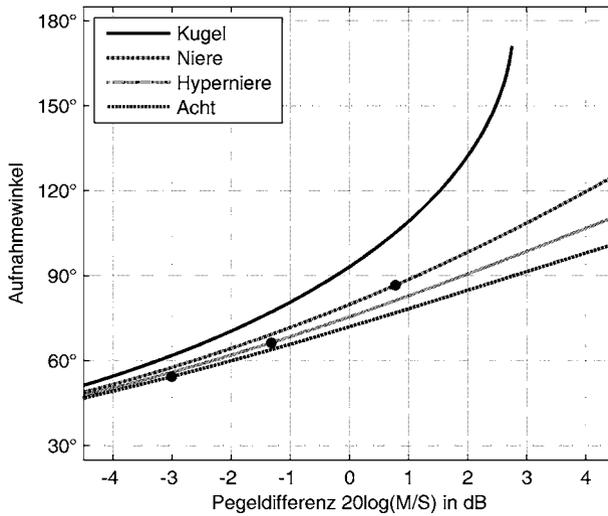


Abb. 10.22 MS-Verfahren. Aufnahmewinkel in Abhängigkeit von der Richtcharakteristik für das M-Signal (Kugel, Niere, Hypernieren, Acht) und der Pegeldifferenz zwischen M und S. Punkte markieren die Pegeldifferenz, bei der frontale Schallquellen um 3 dB gedämpft und somit in der Leistungssumme der Lautsprechersignale mit gleicher Intensität wie seitliche Quellen abgebildet werden. Mit einer Kombination aus Kugel und Acht ist eine volle Ausnutzung der Stereobasis bei gleicher Intensität frontaler und seitlicher Schallquellen nicht erreichbar.

und zunächst das MS-Signal selbst aufzuzeichnen. Dadurch kann bei der Mischung noch Einfluss auf den Aufnahmewinkel genommen werden, z. B. wenn bei der Aufnahme keine ausreichende Abhörkontrolle möglich war. Weiterhin kann durch Verwendung einer Kugel als Mittenmikrofon der im Bassbereich überlegene Frequenzgang von Druckempfängern ausgenutzt werden. Und schließlich liefert das M-Mikrofon ein Mono-Signal, das nicht erst durch Summierung der beiden Stereokanäle mit möglichen Phasenauslöschungen erzeugt werden muss. Das M-Signal kann also auch parallel aufgezeichnet werden, wenn – vor allem beim Fernsehen – ein gutes Monosignal erforderlich ist.

Als MS-Anordnung in drei Raumdimensionen kann das sog. *Soundfield-Mikrofon* angesehen werden. Im Gegensatz zu MS werden allerdings vier koinzidente Signale erzeugt. Obwohl diese auch für eine zweikanalige Stereowiedergabe dekodiert werden können, soll die Anordnung daher bei den mehrkanalstereofonen Verfahren behandelt werden (Abschn. 10.4.1.1).

10.3.2 Laufzeitstereofonie

Als Laufzeitstereofonie werden alle Aufnahmeverfahren bezeichnet, bei denen sich linker und rechter Kanal nur in der Laufzeit, nicht aber (oder nur geringfügig) im Pegel unterscheiden. Ein Signal, das am rechten Mikrofon früher eintrifft als am linken Mikrofon, wird bei der Wiedergabe auf der Stereobasis rechts lokalisiert.

Laufzeitstereofone Aufnahmen können mit einer *AB-Anordnung* aus zwei Mikrofonen realisiert werden oder mit Anordnungen mehrerer Mikrofone, zwischen denen sich je nach Schalleinfallrichtung unterschiedliche Laufzeiten ausbilden.

10.3.2.1 AB-Verfahren

Ein AB-System besteht aus zwei Kapseln mit gleicher Richtcharakteristik, die in einem Basisabstand a nebeneinander montiert sind. Meist werden Druckempfänger mit Kugelcharakteristik verwendet, es sind jedoch auch andere Richtcharakteristiken möglich, wenn etwa der Anteil rückwärtig aufgenommenen Schalls unterdrückt werden soll. Maßgeblich für die Lokalisation ist die effektive Wegdifferenz Δs von der Schallquelle zu den beiden Mikrofonen. Sie beträgt für Quellen, deren Abstand zu den Mikrofonen groß gegenüber dem Basisabstand a ist (Abb. 10.23):

$$\Delta s = a \sin \theta \quad (10.9)$$

Bei Aufnahmen in Laufzeitstereofonie besteht – stärker als bei intensitätsstereofonen Aufnahmen – das Problem der Nichtlinearität zwischen Laufzeitdifferenz und Lokalisierung auf der Lautsprecherbasis (Abb. 10.15). Als Konsequenz kann bei der Wiedergabe ein „Loch in der Mitte“ auftreten: Wenn die Mikrofonbasis so dimensioniert wird, dass seitliche Quellen bei der Wiedergabe 100 % seitlich abgebildet werden, erscheinen auch Quellen, die mit der halben Laufzeitdifferenz bei den Mikrofonen eintreffen, bereits 75 % (statt 50 %) seitlich ausgelenkt (s. Tabelle 10.3). Betrachtet man eine Laufzeitdifferenz von etwa 1,2 ms als ausreichend für eine 100 % seitliche Abbildung, so ergeben sich in Abhängigkeit vom Basisabstand der Mikrofone Aufnahmewinkel nach Abb. 10.24.

Die häufig als *Klein-AB* bezeichnete Aufstellung von zwei parallel ausgerichteten Mikrofonen ungefähr im Ohrabstand von 17 cm erzeugt Laufzeitunterschiede von etwa 0,5 ms für laterale Schallquellen, so dass die Lautsprecherbasis bei der

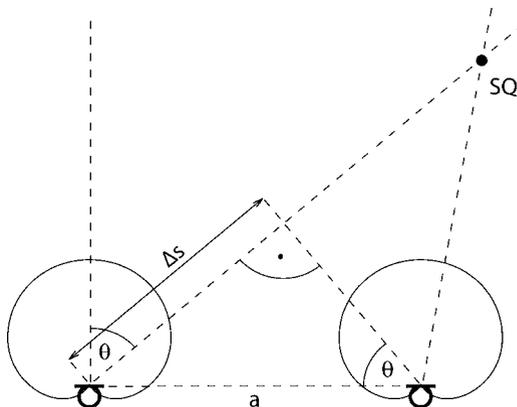


Abb. 10.23 AB-Stereofonie. Die Laufzeitunterschiede zwischen L und R ergeben sich als Funktion des Schalleinfallswinkels θ und des Basisabstands a .

Wiedergabe nur zu etwa 50% ausgenutzt wird. Die durch das natürliche Hören suggerierte Orientierung am Ohrabstand kann hier irreführend sein, da die interaurale Laufzeitdifferenz beim natürlichen Hören zu anderen Lokalisationswinkeln führt als Laufzeitunterschiede im überlagerten Schallfeld zweier Stereo-Lautsprecher (vgl. Abb. 3.12 und Abb. 10.15). Insbesondere führt die durch den Kopf bedingte Abschattung beim natürlichen Hören zu Pegeldifferenzen zwischen den Ohrsignalen, die bei AB-Stereophonie fehlen.

Bei AB-Anordnungen achtet man meist auf eine parallele Ausrichtung der Mikrofone. Bei angewinkelten Mikrofonen entstehen durch die mit höherer Frequenz zunehmende Richtwirkung von Kugelmikrofonen zusätzliche Pegelunterschiede. Sie können zu einer frequenzabhängigen und damit insgesamt unscharfen Lokalisierung führen. Die Ausrichtung von Kugelmikrofonen auf bestimmte Schallquellen eines größeren Ensembles ist jedoch auch ein Mittel der Klanggestaltung und zur Einstellung der Klangbalance, weshalb man in der Praxis häufig auch eine nichtparallele Ausrichtung von Kugelmikrofonen vorfindet.

Eine parallele Ausrichtung von zwei Bändchenmikrofonen in Achtcharakteristik im Abstand von 20 cm wird auch als *Faulkner-Anordnung* bezeichnet (Streicher u. Dooley 1984).

10.3.2.2 Laufzeitstereophonie mit mehr als zwei Mikrofonen

Bei einer Aufnahme breiter Klangkörper (Symphonieorchester, Chöre) werden durch AB-Mikrofonierungen mit schmaler Basis die zentralen Instrumente in der Nähe der Mikrofone bevorzugt abgebildet. Erhöht man den Mikrofonabstand, um eine gleichmäßigere Abbildung zu erzielen, verkleinert sich der Aufnahmewinkel (Abb. 10.24), sodass ein Großteil der Quellen an den Rändern der Lautsprecherbasis abgebildet wird. Um dies zu vermeiden, wird die Anordnung häufig durch ein drittes Mikrofon in der Mitte zu einer *ABC-Anordnung* erweitert. Das mittlere Mikrofon wird im Panorama mittig eingeordnet, d. h. gleichmäßig auf rechten und linken Kanal verteilt. Die ohne das Mittenmikrofon weit außen abgebildeten Schallquellen werden durch das zusätzliche Signal, das ohne Laufzeitdifferenz zu beiden Kanälen addiert wird, in die Mitte gezogen. Diese Addition von ähnlichen, aber laufzeitbehafteten Signalen auf beiden Stereokanälen (Mitte/Links und Mitte/Rechts) kann allerdings zu kammfilterartigen Verzerrungen führen, deren Hörbarkeit durch probeweises Abschalten des Mittenmikrofons überprüft werden kann.

Spezialfall einer ABC-Anordnung ist der sog. *Decca-Tree*, ein von Ingenieuren des englischen Decca-Labels in den 1960er Jahren eingeführtes und später auch bei Aufnahmen des deutschen Teldec-Labels häufig benutztes Verfahren für Aufnahmen mit großen Klangkörpern (Gernemann 2002). Drei Druckempfänger sind in einem etwa gleichseitigen Dreieck von 1 bis 2,5 m Kantenlänge angeordnet. Die Vorzüge des eingerückten, mittleren Mikrofons liegen in einer gleichmäßigeren Abbildung von Klangkörpern, die nicht auf einer Linie, sondern halbkreisförmig angeordnet sind. Dies betrifft z. B. die bessere Abbildung der mittleren Streicher bei Orchesteraufnahmen, wenn der Decca-Tree etwa über dem Kopf

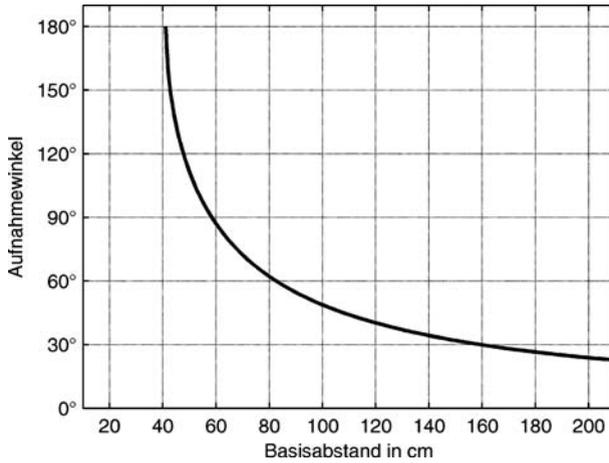


Abb. 10.24 AB-Stereofonie. Aufnahmewinkel für verschiedene Basisabstände a

des Dirigenten angebracht ist. Durch den relativ zur Gesamtabmessung des Systems maximalen Abstand der Mikrofone untereinander (im gleichseitigen Dreieck) und die nichtparallele Ausrichtung der Mikrofone (Abb. 10.25) werden die Einzelsignale „unterschiedlicher“, wodurch kammfilterartige Verfärbungen minimiert werden.

Verfahren zur Aufnahme sehr breiter Klangkörper mit vier oder fünf Kugelmikrofonen werden als *ABCD-*, *ABCDE-Verfahren* oder als *Kugelvorhang* bezeichnet. Die Addition einer großen Anzahl von Signalen mit unterschiedlichen Laufzeiten bedingt eine insgesamt unscharfe Richtungsabbildung, da jede Schallquelle durch mehrere Phantomschallquellen abgebildet wird, die sich zwischen denjenigen Mikrofonpaaren bilden, die bei der Wiedergabe dem rechten und linken Summenkanal zugeordnet sind. Bereits bei drei Mikrofonen entstehen für jede Schallquelle drei Phantomschallquellen für die Mikrofonpaare A/B, A/C und B/C. Die mangelnde Lokalisationsschärfe von Einzelquellen wird jedoch häufig auch als „dichtes“, „volles“ Klangbild wahrgenommen. Wie bei ABC ist eine Kontrolle auf Verfärbungen durch kammfilterartige Verzerrungen notwendig.

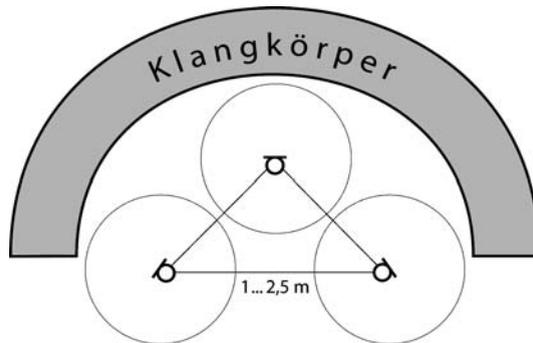


Abb. 10.25 Drei Druckempfänger (ABC) in einer Anordnung als Decca-Tree

10.3.3 Äquivalenzstereofonie

Alle Aufnahmeverfahren, die sowohl Pegel- als auch Laufzeitunterschiede zur Abbildung benutzen, werden als *gemischte Verfahren* oder *Äquivalenzstereofonie* bezeichnet. Die Berechnung ihres Aufnahmewinkels beruht auf der Annahme, dass sich die Wirkung von Pegel- und Laufzeitunterschieden auf die Lokalisation der Phantomschallquelle annähernd linear überlagert. In Hörversuchen zur Wirkung von gleichsinnigen Pegel- und Laufzeitunterschieden wurde eine Äquivalenz von 1 dB Pegeldifferenz und $60 \mu\text{s}$ Laufzeitdifferenz ermittelt, ebenso in Versuchen mit äquivalenzstereofonen Mikrofonsystemen (Theile 1984, Abb. 10.26).

Die Wirkung von *gegensinnigen* Pegel- und Laufzeitunterschieden („links früher“ und „rechts lauter“) wird durch die sog. *Tradingkurve* beschrieben (Franssen 1962). Sie weist eine höhere Steigung von etwa $250 \mu\text{s}$ Laufzeitdifferenz entsprechend 1 dB Pegeldifferenz auf als die Äquivalenzkurve. Bei Mikrofonaufnahmen wird die Erzeugung gegensinniger Pegel- und Laufzeitunterschiede allerdings generell vermieden, weil sie zu unscharfen bzw. mehrdeutigen Abbildungen führt.

Beispiele für gemischte Verfahren sind die von Toningenieuren des französischen Rundfunks vorgeschlagene *ORTF-Anordnung* (**O**ffice de **R**adiodiffusion-**T**élévision **F**rançaise, bis 1974 die öffentlich-rechtliche Rundfunkanstalt Frankreichs), sowie die vom niederländischen Rundfunk eingeführte *NOS-Anordnung* (für **N**iederlandsche **O**mroep **S**tichting, eine Rundfunkanstalt innerhalb des öffentlich-rechtlichen Rundfunks der Niederlande).

Abb. 10.28 zeigt die aus der Äquivalenzkurve (Abb. 10.26) und der Lokalisationskurve für Pegeldifferenzen (Abb. 10.15) abgeleiteten Aufnahmewinkel für gemischte Systeme in Abhängigkeit vom Basisabstand a für verschiedene Hauptachsenwinkel α . Wie bei XY-Systemen werden frontale Schallquellen nur bei einem

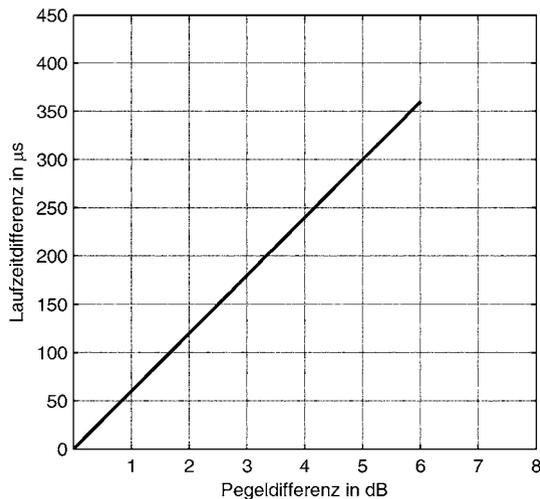


Abb. 10.26 Äquivalenz von Pegel- und Laufzeitunterschieden bei der Lokalisation von Phantomschallquellen

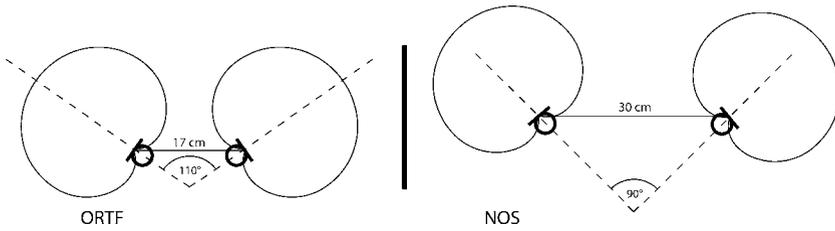


Abb. 10.27 Varianten der Äquivalenzstereofonie (gemischte Verfahren): ORTF und NOS

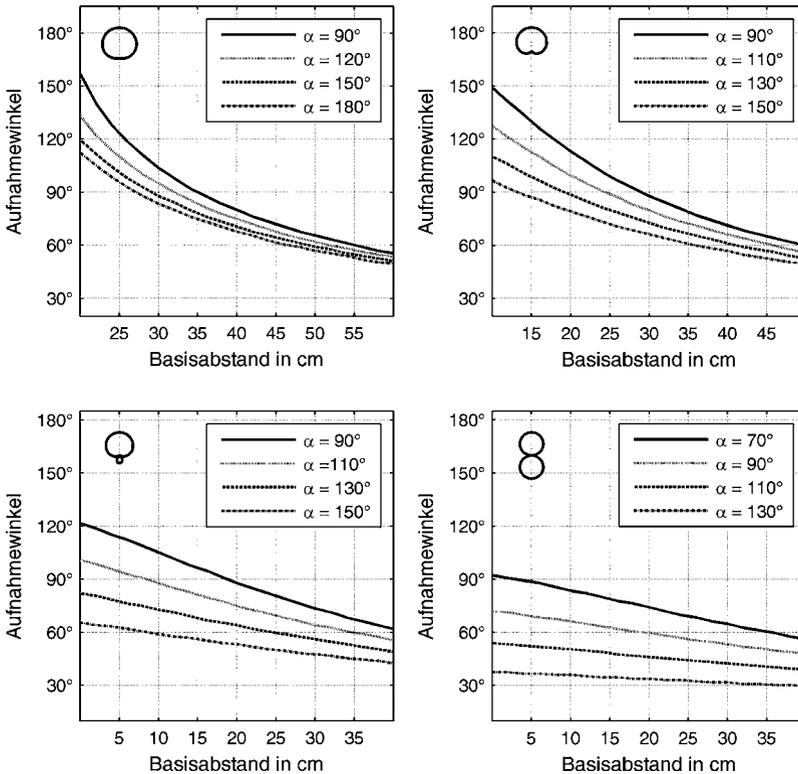


Abb. 10.28 Aufnahmewinkel für gemischte Aufnahmeverfahren in Abhängigkeit vom Basisabstand a für die Richtcharakteristiken Breite Niere, Niere, Superniere und Acht und verschiedene Hauptachsenwinkel α

Hauptachsenwinkel, bei dem sie in beiden Mikrofonen um 3 dB gedämpft erscheinen, in der Leistungssumme der Lautsprechersignale mit gleicher Intensität wie seitliche Quellen abgebildet. Hierfür müssen die Mikrofone in einem Hauptachsenwinkel von 180° (Breite Nieren), 130° (Nieren), 114° (Supernieren), 104° (Hypernieren) bzw. 90° (Achten) montiert werden (vgl. Tabelle 7.2).

10.3.4 Trennkörperstereofonie

Ein Spezialfall der gemischten Stereofonie ist die *Trennkörperstereofonie*, bei der die Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Kanal nicht durch die Richtcharakteristik der Mikrofone, sondern durch einen Trennkörper zwischen zwei Druckempfängern mit Kugelcharakteristik erzeugt werden. Der Trennkörper erfüllt konzeptionell die Funktion des Kopfes beim natürlichen Hören und erzeugt aufgrund seines Beugungsverhaltens frequenzabhängige Schalldruckpegelunterschiede an den Mikrofonen, die zu beiden Seiten der Konstruktion angebracht sind. Der Abstand der Mikrofone entspricht meist in etwa dem Ohrabstand.

Bei dem vom Schweizer Toningenieur Jürg Jecklin entwickelten *OSS-Mikrofon* (für **O**ptimales **S**tereo-**S**ignal) sind zwei Druckempfänger im Abstand von 20 cm zu beiden Seiten einer Scheibe (*Jecklin-Scheibe*) von 30 cm Durchmesser montiert. Die Scheibe hat eine bei hohen Frequenzen absorbierende Schaumstoffoberfläche, um kammfilterartige Verzerrungen durch den an der Scheibe reflektierten Schall zu unterdrücken (Jecklin 1981). Eine kugelförmige Verdickung der absorbierenden Beschichtung bei der von der Fa. MBHO vertriebenen Variante der Scheibe (*Schneider-Scheibe*) bewirkt eine bessere Unterdrückung von Reflexionen, höhere stereofone Pegeldifferenzen und damit eine größere stereofone Abbildungsbreite bereits bei Frequenzen oberhalb von 200 Hz.

Bei der Konstruktion *Clara* sind zwei Druckempfängerkapseln bündig in die Oberfläche einer parabelförmigen Acrylscheibe eingelassen (Breh 1986). Auch hier entspricht die Größe des Acrylkörpers etwa den Kopfabmessungen. Durch die bündige Montage der Kapsel werden Klangverfärbungen durch Schallreflexionen an der Oberfläche des Trennkörpers vermieden.

Den gleichen Vorzug weist das vom Münchener Institut für Rundfunktechnik (IRT) entwickelte *Kugelflächenmikrofon* auf, das seit 1990 von der Fa. Schoeps hergestellt und vertrieben wird. Zwei diffusfeldentzerrte Druckempfänger-Kapseln sind bündig in eine schallharte Kugel von 20 cm Durchmesser eingelassen. Durch die Entzerrung der Kapseln und durch die Kapselpositionen bei $\pm 100^\circ$ relativ zur stereofonen Hauptachse der Kugel überlagern sich Abschattungs- und Druckstau-



Abb. 10.29 Verschiedene Varianten der Trennkörperstereofonie: SASS, Kugelflächenmikrofon, Jecklin-Scheibe, Clara (Fotos: Fa. Schoeps Mikrofone, Fa. Crown)

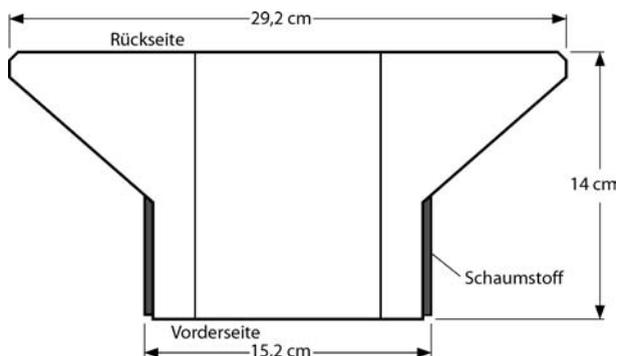


Abb. 10.30 SASS Mikrofon – Querschnitt

effekt so, dass sich ein annähernd linearer Frequenzgang im Freifeld ebenso wie im Diffusfeld ergibt, und, damit gleichbedeutend, ein frequenzunabhängiges Bündelungsmaß (Theile 1986, Geyersberger 1990). Das Kugelflächenmikrofon der Fa. Schoeps (KFM 6) hat einen stereofonen Aufnahmewinkel von 90° (Wuttke 1992).

Das *SASS Mikrofon* der Fa. Crown (für **Stereo Ambient Sampling System**TM) verwendet zwei Grenzflächenmikrofone, die im Abstand von 17 cm in einen Trennkörper eingelassen sind, der sich nach hinten keilförmig verbreitert. Durch den Einsatz von Grenzflächenmikrofonen wird, ebenso wie beim Kugelflächenmikrofon, das Problem von Reflexionen am Trennkörper vermieden. Die schaumstoffverkleidete Trennscheibe mindert das Übersprechen bei hohen Frequenzen, während für Frequenzen unterhalb von 500 Hz praktisch keine Pegeldifferenzen entstehen. Der Aufnahmewinkel des Systems liegt bei etwa 90° , für Einfallswinkel von $>125^\circ$ zu beiden Seiten der stereofonen Hauptachse tritt aufgrund der Form des Trennkörpers eine starke Abschattung auf (Bartlett u. Billingsley 1990a, Bartlett u. Billingsley 1990b).

Auch ein von Defossez (1986) vorgeschlagener *Grenzflächen-Keil* nutzt für ein Trennkörperverfahren Grenzflächenmikrofone, die in einen nach vorne spitz zulauenden Keil eingesetzt sind. Der Winkel zwischen den Keilflächen ist hier allerdings variabel zwischen 60° und 90° einstellbar.

Trennkörperstereofone Systeme zeichnen sich bei Hörversuchen, ebenso wie gemischte Verfahren im Allgemeinen, durch eine gute Lokalisierbarkeit der aufgenommenen Schallquellen aus. Die mit der Verwendung von absorbierenden Trennkörpern wie bei OSS einhergehende Höhendämpfung für die jeweils abgewandte Mikrofonkapsel wird in Hörvergleichen allerdings häufig als „verfärbt“ bewertet (Wöhr u. Nellessen 1986). Ein in der Praxis auftretendes Problem aller Trennkörperverfahren ist der durch die Konstruktion fest vorgegebene Aufnahmewinkel. So lässt sich die Abbildungsbreite des aufgenommenen Klangkörpers nur verändern, indem die Schallquellen relativ zum Mikrofon neu positioniert werden.

10.3.5 Binaurale Aufnahme

Binaurale Aufnahmen wandeln den Schalldruck, wie er beim natürlichen Hören vor den Trommelfellen der beiden Ohren vorliegt. Es werden daher zwei Druckempfänger-Kapseln verwendet, die im Gehörgang des eigenen Ohres oder eines dem menschlichen Kopf nachgebildeten Kunstkopfes angebracht sind. Auf diese Weise wird das einfallende Schallsignal durch die Außenohrübertragungsfunktion gefiltert, welche für jede Schalleinfallrichtung die Wirkung unserer Kopfanatomie auf den einfallenden Schall beschreibt (s. Kap. 3.1.1). Bei der Wiedergabe binauraler Signale über Kopfhörer wird somit im Idealfall das Schallfeld am Aufnahmeort originalgetreu reproduziert.

Die Außenohrübertragungsfunktion (AOÜF, auch HRTF für *head-related transfer function*) ist das Ergebnis von akustischer Abschattung, Beugung, Verzögerung, Resonanzen und Reflexionen durch Torso, Schulter, Kopf, Ohrmuscheln (pinnae), den Eingang in den Ohrkanal (cavum conchae) und den Ohrkanal selbst. Den größten Einfluss auf den Verlauf der HRTF haben Kopf und Ohrmuscheln, während die Schulter bei bestimmten Frequenzen einen Einfluss von etwa ± 5 dB und der Torso von etwa ± 3 dB auf den Frequenzgang der HRTF hat (Gierlich 1992, s.a. Abb. 7.36).

Obwohl die Bedeutung von Schulterbereich und Torso für die Plausibilität von binauralen Aufnahmen durch Hörversuche belegt ist (Minnaar et al. 2001), werden sie im Gegensatz zu Kopf und Ohrmuscheln nicht von allen Kunstkopfsystemen nachgebildet (Abb. 10.33). Von großer Bedeutung für den Verlauf der HRTF oberhalb von 1 kHz ist der Aufnahmeort innerhalb des Ohrkanals (Abb. 10.32). Allerdings hat sich dieser Einfluss in zahlreichen Untersuchungen als unabhängig von der Schalleinfallrichtung erwiesen. Er kann daher durch eine konventionelle, richtungsunabhängige Entzerrung ausgeglichen werden, ohne die räumliche Zuordnung der Hörereignisse zu beeinträchtigen.

Da die interindividuellen Unterschiede von HRTFs bei einer Messung am geblockten Ohrkanal am geringsten sind, wird bei Kunstkopfsystemen meist ein Minia-

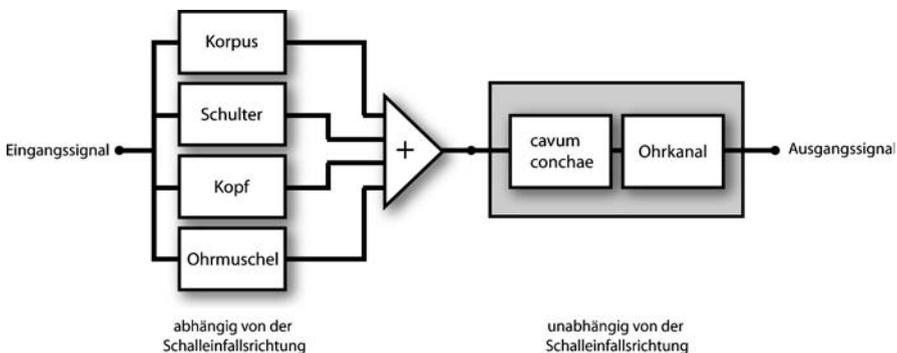


Abb. 10.31 Richtungsabhängige und richtungsunabhängige Komponenten der Außenohrübertragungsfunktion. Die richtungsabhängigen Einflüsse von Korpus, Schulter, Kopf und Ohrmuschel sind das Ergebnis von Schallbeugung und -reflexion. Die richtungsunabhängigen Einflüsse sind das Ergebnis von Resonanzen im Ohrkanal.

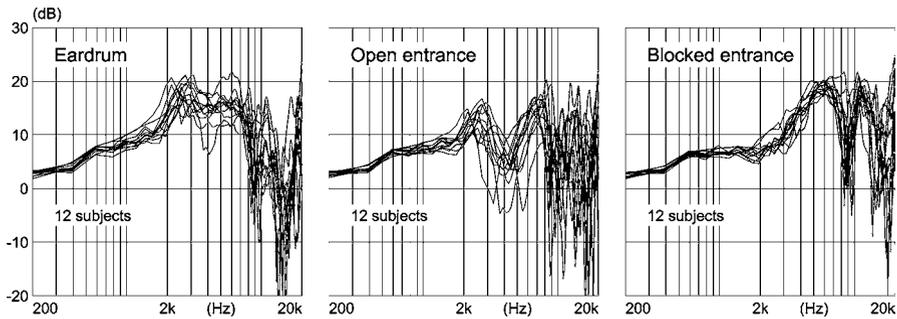


Abb. 10.32 Außenohrübertragungsfunktionen von zwölf Personen, gemessen an verschiedenen Positionen: Vor dem Trommelfell (links), am offenen Eingang zum Ohrkanal (Mitte) und am geblockten Eingang zum Ohrkanal (rechts), nach (Hammershøi u. Møller 2002)

turmikrofon bündig einige Millimeter innerhalb des Ohrkanals eingesetzt. Da aber auch hier oberhalb von 2 kHz erhebliche Unterschiede zwischen den HRTFs verschiedener Personen bestehen, ist es nicht erstaunlich, dass die räumliche Zuordnung von binaural aufgenommenen und wiedergegebenen Signalen mit dem eigenen Kopf in der Regel besser als über einen „fremden“ Kunstkopf gelingt. Hierbei ist allerdings ein gewisser Lerneffekt zu beobachten, also die Fähigkeit, sich auf die Eigenschaften des fremden Kopfes einzustellen (Minnaar et al. 2001). Die meisten Kunstkopfsysteme sind „Durchschnittsköpfe“, die sich an Mittelwerten aus anthropometrischen Datenbanken orientieren (DIN V 45608, IEC TR 60959, ANSI S3.36, ITU-T P.58).

Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Kunstkopfsystemen für verschiedene Anwendungen verfügbar. Der Kunstkopf KU100 der Fa. Neumann wird überwiegend für Musik- und Sprachaufnahmen eingesetzt. Als Nachfolger der Systeme KU80 (1973–81) und KU81 (1982–93) ist er bereits die dritte Gerätegeneration. Er verwendet zwei Druckempfänger vom Typ KM83 ($\varnothing = 21$ mm) am Ende einer 4 mm langen Nachbildung des Ohrkanals. Während der Kunstkopf KU80 zunächst über einen freifeldentzerrten Frequenzgang verfügte, sind die Typen KU81 und KU100 auf einen linearen Frequenzgang im Diffusfeld entzerrt, um Klangfarbenfehler bei der Wiedergabe über Lautsprecher zu minimieren (Theile 1981). Andere Systeme werden überwiegend in der akustischen Messtechnik eingesetzt, etwa bei der Messung binauraler raumakustischer Kriterien, im Bereich *Sound Quality* oder beim akustischen Produktdesign. Die Form von Kopf und Torso geht von stilisierten (Brüel & Kjær HATS 4100) bzw. durch mathematische Funktionen definierten Modellen (Head Acoustics HMS III) bis zu weitgehend detailgetreuen Nachbildungen (KEMAR 45BA, Cortex Electronic MK1). Zur Anpassung an die akustischen Verhältnisse bei Aufnahme und Wiedergabe sind häufig verschiedene Entzerrungsarten wählbar. Dazu gehört eine Freifeldentzerrung, eine Diffusfeldentzerrung oder eine benutzerspezifische bzw. auf bestimmte Kopfhörermodelle zugeschnittene Entzerrung (s. Kap. 11.8.4.3). Einige Modelle (KEMAR) werden mit verschiedenen Aussenohrtypen angeboten, die typisch für weibliche, männliche, amerikanisch/europäische und asiatische Hörer sind. Für Anwendungen in der Telekommunikation, etwa bei der messtechnischen und

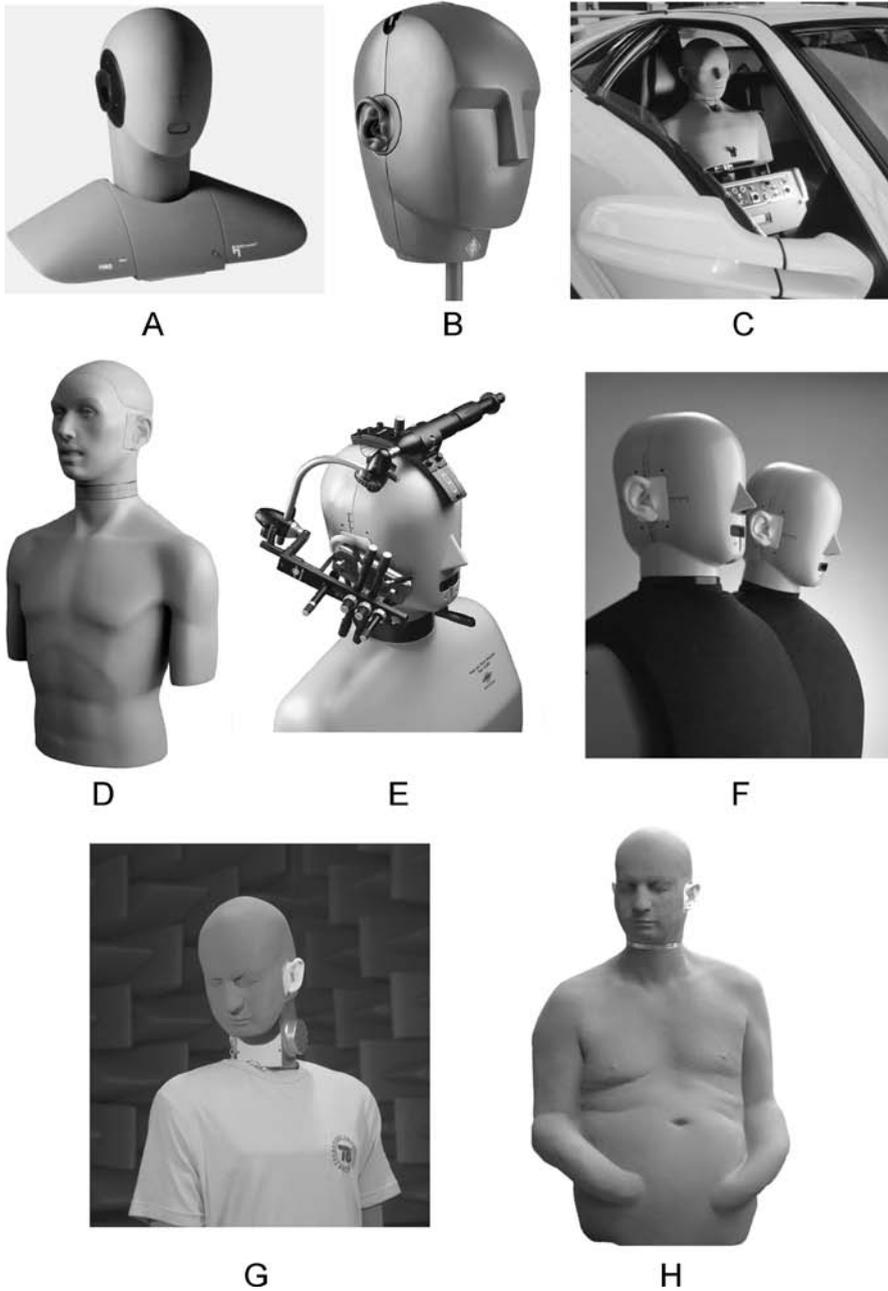


Abb. 10.33 Verschiedene Kunstkopfsysteme: A: Head Acoustics HMS III, B: Neumann KU 100, C: Cortex MK1, D: KEMAR KB 4004, E: Brüel & Kjær HATS 4128, F: Brüel & Kjær HATS 4100; G: FABIAN; H: Moldrzyk (Fotos: Fa. Head Acoustics, Georg Neumann GmbH, 01dB GmbH, G.R.A.S. Sound & Vibration, Brüel & Kjær GmbH, TU Berlin, C. Moldrzyk/Fa. Visaural)

perzeptiven Evaluation von Mobiltelefonen gibt es Modelle mit vollständiger Ohrkanal- und Trommelfellimpedanzsimulation, Sprachsimulator und zusätzlich erhältlichen Handapparatehaltern und -positionierern (Brüel & Kjær 4128).

Einige neuere Systeme verfügen über Schrittmotoren oder Servomotoren, mit denen der Kopf in der Horizontalebene (Moldrzyk et al. 2004, Christensen et al. 2005) oder in mehreren Freiheitsgraden (FABIAN, Lindau u. Weinzierl 2007) softwaregesteuert bewegt werden kann. Auf diese Weise können ohne manuellen Eingriff komplette Datensätze von binauralen Raumimpulsantworten für ein definiertes Raster von Kopforientierungen gemessen werden, wie sie in der Binauraltechnik für die Simulation virtueller akustischer Umgebungen verwendet werden (s. Kap. 11.8.4).

Die ersten Kunstkopfsysteme wurden bereits Ende der 1960er Jahre entwickelt (Kürer et al. 1969, Damaske u. Wagener 1969) und zunächst für Untersuchungen zur subjektiven, vergleichenden Beurteilung der Hörsamkeit in Konzertsälen eingesetzt (Wilkens 1972, Lehmann & Wilkens 1980). Nachdem die ersten Rundfunksendungen binaural aufgenommener Hörspiele (*Demolition*, 1973) mit Euphorie aufgenommen wurden, haben sich insbesondere im Bereich der Musikaufnahme die unvermeidlichen Klangverfärbungen bei der Lautsprecherwiedergabe von binaural aufgenommenen Signalen als problematisch erwiesen, ebenso die fehlende Gestaltungsmöglichkeit bei der Klangregie, da mit dem Einsatz zusätzlicher Mikrofone zur Einstellung der Klangbalance die Vorzüge der Kunstkopfstereofonie, insbesondere die Außer-Kopf-Lokalisation und die gute Lokalisierbarkeit von Schallquellen im Raum auch bei Kopfhörerwiedergabe verloren gehen. Ein weiteres Manko von Kunstkopfaufnahmen ist das Phänomen, dass frontale und rückwärtige Schalleinfallrichtungen, welche die gleiche interaurale Laufzeitdifferenz hervorrufen, kaum unterschieden werden können (*cones of confusion*, Kap. 11.8.4.4). Die für diese Unterscheidung notwendigen Peilbewegungen des Kopfes bleiben bei der Wiedergabe von konventionellen Kunstkopfaufnahmen ohne Wirkung auf das binaurale Signal, anders als in der binauralen Simulation, wo Kopfbewegungen von einem Positionsensor abgetastet werden und die Auralisation entsprechend nachgeführt wird.

Im Bereich der Musikproduktion hat der Kunstkopf als Aufnahmeverfahren daher nie nennenswerte Verbreitung gefunden. Im Bereich der akustischen Messtechnik, im akustischen Produktdesign (Telefonie, Fahrzeugentwicklung), in der Psychoakustik, im Bereich Lärmschutz und Lärmwirkungsforschung und in der Musikrezeptionsforschung ist er heute jedoch ein unverzichtbares Werkzeug für Forschung und Entwicklung.

10.4 Mehrkanalstereofone Aufnahmen

Bei mehrkanalstereofonen Aufnahmen werden Schallquellen durch Laufzeit- und/oder Pegelunterschiede zwischen mehr als zwei Kanälen kodiert, um bei der Wiedergabe über mehrkanalige Wiedergabesysteme eine räumliche Abbildung durch die Ausbildung von Phantomschallquellen zwischen den Lautsprechern zu erzielen. Im

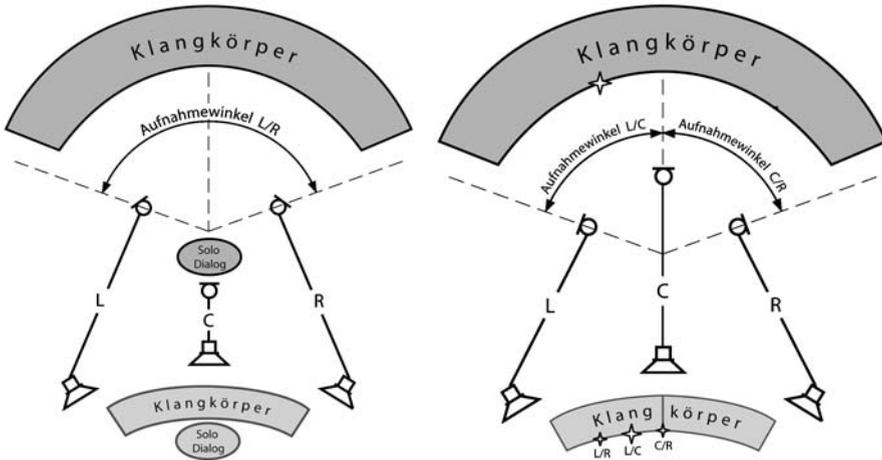


Abb. 10.34 Zwei Varianten der Abbildung von Phantomschallquellen über drei Frontlautsprecher: Links: Phantomschallquelle nur zwischen L und R, C als wird als reale Schallquelle für monofone Signale eingesetzt. Rechts: Phantomschallquellen zwischen L und C sowie C und R. Die unerwünschte Phantomschallquelle zwischen LR und CR (für eine linksseitige Quelle) kann durch Reduktion des Übersprechens zwischen L und R durch geeignete Richtcharakteristiken unterdrückt werden.

Gegensatz zu einzelmikrofonierten Aufnahmen dürfen die Laufzeit- und Pegeldifferenzen, mit der eine Schallquelle auf verschiedene Kanäle aufgezeichnet wird, hier nicht zu groß sein, damit bei der Wiedergabe eine Phantomschallquelle zwischen den Lautsprechern entstehen kann. Für die Nutzung der drei Frontkanäle, wie sie für die Wiedergabe von Tonträgern nach ITU-R BS 775-1 (Abb. 11.13) und für alle gängigen Kinoformate vorgesehen sind, gibt es im Wesentlichen zwei Varianten.

Bei Variante 1 („Stereo plus Center“) werden Phantomschallquellen nur zwischen den Kanälen L und R abgebildet, während der Center-Kanal für monofon aufgenommene Quellen (Abb. 10.34 links) genutzt wird. Dieses Verfahren ist üblich im Bereich des Filmtons, wo stereofone Signale (v. a. Filmmusik und Atmo) überwiegend über L und R wiedergegeben werden, während der Centerkanal für den Dialog benutzt wird. Auch bei mehrkanaligen Musikproduktionen wird der Centerkanal häufig für monofon mikrofonierte Solisten genutzt, während ausgedehnte Quellen (Orchester, Instrumentalgruppen) stereofon über L und R aufgenommen und wiedergegeben werden. Für Aufnahmen dieser Art können somit, trotz mehrkanaliger Wiedergabe, traditionelle monofone und zweikanalstereofone Aufnahmeverfahren zum Einsatz kommen.

Bei Variante 2 (segmentiertes Schallfeld) werden Phantomschallquellen zwischen den Kanälen L und C sowie C und R abgebildet (Abb. 10.34 rechts). Um eine kontinuierliche und eindeutige Abbildung ausgedehnter Klangkörper auf der Lautsprecherbasis LCR zu erreichen, müssen die Aufnahme Winkel der Mikrofonpaare LC und CR daher lückenlos und ohne Überlappung aneinander anschließen. Der Aufnahme Winkel der beiden Mikrofonpaare ergibt sich aus Abstand, Position und Ausrichtung der Mikrofone, eine zusätzliche Drehung der stereofonen Hauptachsen

kann durch Laufzeit- oder Pegeldifferenzen zwischen den Mikrofonpaaren auf elektronischem oder akustischem Weg erreicht werden. Eine systematische Diskussion dieser Varianten findet man bei (Williams u. Le Dü 1999). Unerwünschte, aber unvermeidliche Doppelabbildungen durch Phantomschallquellen, die sich zwischen L und R und, wie in Abb. 10.34 exemplarisch für eine halblinks positionierte Schallquelle gezeigt, C und R bilden, können nur durch Reduktion des Übersprechens zwischen L und R durch eine geeignete Richtcharakteristik und Ausrichtung der äußeren Mikrofone unterdrückt werden.

Die meisten dieser mehrkanalstereofonen Aufnahmeverfahren nehmen eine Segmentierung des Schallfelds durch die Aufnahmewinkel zweier stereofoner Mikrofonpaare mit einem gemeinsamen Mittenmikrofon vor. Wie bei Zweikanalsystemen unterscheidet man auch hier intensitätsstereofone, laufzeitstereofone, gemischte und trennkörperstereofone Verfahren.

10.4.1 Koinzidenzverfahren

10.4.1.1 Soundfield-Mikrofon

Das Soundfield-Mikrofon basiert auf einer mathematischen Theorie der Schallfeldabtastung auf einer kugelsymmetrischen Oberfläche (Gerzon 1975). Es liefert Mikrofonensignale, die für eine Wiedergabe im Ambisonics-Verfahren geeignet sind (s. Kap. 11.8.2) und ist seit Mitte der 1970er Jahre als integriertes Mikrofonensystem erhältlich. Das Aufnahmeverfahren lässt sich als Erweiterung des MS-Verfahrens auf drei Raumdimensionen verstehen (Abb. 10.35).

Tabelle 10.4 Schallfeldanteile und Koordinaten im B-Format

Koordinate (B-Format)	Schallfeldkomponente	Mikrofon-Richtcharakteristik
W	Schalldruck	Kugel
X	Druckgradient	Acht (vorne-hinten)
Y	Druckgradient	Acht (links-rechts)
Z	Druckgradient	Acht (oben-unten)

Während beim MS-Verfahren ein Druckanteil (M-Signal) und ein Gradientenanteil in Richtung der Ohrachse (S-Signal) aufgenommen wird, liefert das Soundfield-Mikrofon einen Druckanteil (W-Signal) und drei Gradientenanteile in X-Richtung (vorne-hinten), Y-Richtung (links-rechts) und Z-Richtung (oben-unten). In der Ambisonics-Terminologie wird die Kombination dieser vier Signale als *B-Format* bezeichnet. Im Gegensatz zu einem MS-Mikrofon werden die Mitten- und Seitensignale beim Soundfield-Mikrofon jedoch nicht direkt durch die Richtcharakteristiken Kugel und Acht erzeugt, da es sich im Hinblick auf ein symmetrisches Mikrofondesign als günstiger erwiesen hat, vier Kapseln mit der Richtcharakteristik Breite Niere in Form eines Tetraeders anzuordnen (Abb. 10.36). Durch elektronische Kompensation der Kapselabstände werden die Signale auf den Mittelpunkt des Tetraeders

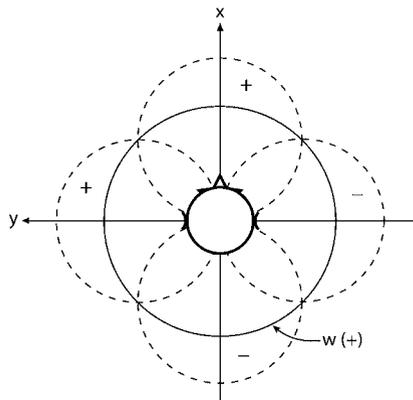


Abb.10.35 Zerlegung des Schallfelds am Hörerort in einen Druckanteil (w) und Gradientenanteile in x - und y -Richtung (z -Richtung nicht sichtbar)



Abb. 10.36 Soundfield-Mikrofonsystem. Oben: Anordnung der vier Mikrofonkapseln zur Aufnahme im A-Format (Left Front LF, Right Front RF, Left Back LB und Right Back RB) und geschlossenes Mikrofongehäuse. Unten: Controller zum Processing der A-Format-Signale (Fotos: Soundfield Ltd.)

interpoliert, sodass sich eine messtechnisch verifizierbare Koinzidenz bis zu einer Frequenz von etwa 10 kHz erreichen lässt.

Die Ausgangssignale des Tetraeder-Mikrofons (LF, RF, LB, RB) werden als *A-Format* bezeichnet. Durch Summen- und Differenzenbildung in einem nachgeschalteten Controller werden die Signale in entsprechende B-Format-Signale umgewandelt. Dabei gilt

$$\begin{aligned} W &= LF + LB + RF + RB \\ X &= LF - LB + RF - RB \\ Y &= LF + LB - RF - RB \\ Z &= LF - LB - RF + RB \end{aligned} \quad (10.10)$$

Neben dieser Matrizierung erlaubt der Controller durch unterschiedliche Gewichtung und Phasenlage der einzelnen Mikrofonssignale auch die Bildung eines zweikanaligen, koinzidenten Signals. Die ebenfalls durch Summen- und Differenzenbildung erzeugte, scheinbare Richtcharakteristik dieses Stereo-Systems kann durch eine Einstellung von *Azimuth* und *Elevation* horizontal und vertikal gedreht und in seiner Richtwirkung stärker oder schwächer fokussiert werden (*Dominance*). Bei vierkanaliger Aufzeichnung im B-Format können diese Einstellungen auch in der Nachbearbeitung vorgenommen werden, was das Soundfield-Mikrofon zu einem sehr flexiblen Aufnahmeinstrument macht. Im Bereich der Musikproduktion hat das Ambisonics-Verfahren allerdings keine breite Akzeptanz gefunden.

Zu den theoretischen Grundlagen des Soundfield-Mikrofons s. (Gerzon 1975), zur praktischen Ausführung s. (Farrar 1979a) und (Farrar 1979b).

10.4.1.2 Doppel-MS

Eine Kombination von zwei separaten MS-Systemen an unterschiedlichen Mikrofonpositionen zur Aufnahme direkter und räumlicher Schallanteile wurde aufgrund der guten Monokompatibilität koinzidenter Systeme bereits für zweikanalstereofone Aufnahmen vorgeschlagen (Pizzi 1984). Um ein mehrkanalstereofones Hauptmikrofonssystem zu erhalten, lässt sich je ein nach vorne und nach hinten ausgerichtetes Nierenmikrofon mit einem gemeinsamen S-Signal für Front- und Surroundkanäle kombinieren, wodurch die Anordnung auf drei Mikrofone reduziert wird. Bei der Wiedergabe stehen somit zwei MS-Systeme für Front- und Surroundkanäle zur Verfügung, der Center-Kanal kann aus dem vorderen M-Signal gespeist werden (Wuttke 2001).



Abb. 10.37 Doppel-MS Anordnung mit zwei Nieren und Acht (links), sowie mit einem Richtrohrmikrofon als frontales Mittenmikrofon und einer Niere als rückwärtiges Mittenmikrofon (rechts) (Fotos: Fa. Schoeps Mikrofone)

10.4.2 Laufzeitverfahren

10.4.2.1 Decca-Tree Multichannel

Eine laufzeitstereofone Anordnung ergibt sich, wenn die drei Mikrofone eines Decca-Trees (s. Abschn. 10.3.2) auf die drei Frontkanäle einer Surround-Wiedergabe geroutet werden. Das Problem multipler Phantomschallquellen zwischen LR, LC und CR besteht im Grundsatz auch hier, allerdings kann durch ausreichenden Mikrofonabstand und entgegengesetzte Ausrichtung der Mikrofone das Übersprechen zwischen L und R verringert werden.

Vernachlässigt man die Phantomschallquelle zwischen den äußeren Mikrofonen, so können die Druckempfänger L, C und R so angeordnet werden, dass das Schallfeld bei der Aufnahme durch die Aufnahmewinkel der Mikrofonpaare LC und CR lückenlos und ohne Überlappung abgetastet wird. Bei fünfkanaliger Wiedergabe nach ITU-R BS 775-1 werden alle Schallquellen als Phantomschallquellen zwischen den frontalen Lautsprechern LC und CR abgebildet. Um einen bestimmten Gesamt-Aufnahmewinkel zu erreichen, sind Mikrofonabstände nach Tabelle 10.5 erforderlich (Herrmann et al. 1998). Zur Anordnung s. Abb. 10.38, allerdings werden für den Decca-Tree Druckempfänger mit Kugelcharakteristik eingesetzt.

Tabelle 10.5 Gesamtaufnahmewinkel und Mikrofonabstände für eine Anordnung mit drei Druckempfängern entsprechend Abb. 10.38

Gesamtaufnahmewinkel	Mikrofonabstand a in cm	Mikrofonabstand b in cm
100	87,5	158,5
120	74	128
140	64,5	105,5
160	57,5	88

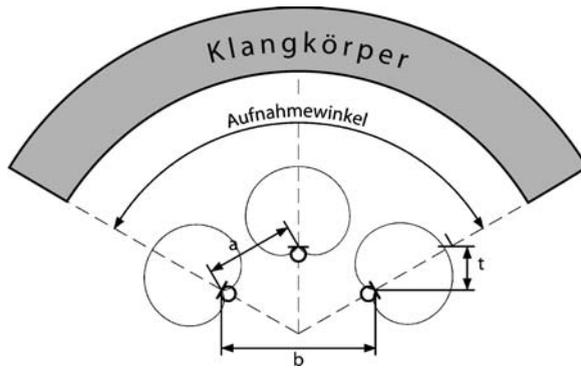


Abb. 10.38 Ideale Nieren-Anordnung INA 3

10.4.3 Gemischte Verfahren

10.4.3.1 INA 3 und INA 5

Für das Verfahren INA 3 (für „Ideale Nieren-Anordnung“) werden drei Nierenmikrofone L, C und R so angeordnet, dass die Aufnahmewinkel der Mikrofonpaare LC und CR aneinander angrenzen, ohne sich zu überlappen. Dadurch soll ein ausgedehnter Klangkörper vor dem Mikrofon bei der Wiedergabe über drei Front-Lautsprecher lückenlos abgebildet werden, ohne dass Mehrfachabbildungen von einzelnen Schallquellen entstehen (Herrmann et al. 1998). Die erforderlichen Mikrofonabstände und Hauptachsenwinkel wurden von den Autoren nach (Williams 1987) bestimmt (Tabelle 10.6). Aufgrund der hohen Laufzeit- und Pegeldifferenz wird angenommen, dass sich zwischen L und R keine Phantomschallquelle ausbildet, die sich mit den Phantomschallquellen zwischen LC und CR überlagert.

Tabelle 10.6 Aufnahmewinkel und Mikrofonabstände für die Anordnung INA 3

Aufnahmewinkel	Mikrofonabstand <i>a</i> in cm	Mikrofonabstand <i>b</i> in cm	Systemtiefe <i>t</i> in cm
100°	69	126	29
120°	53	92	27
140°	42	68	24
160	32	49	21

Bei der Variante INA 5 wird das System um zwei zusätzliche Nierenmikrofone für die Surroundwiedergabe zu einer fünfkanaligen Anordnung erweitert, bei der die gesamte horizontale Hörfläche durch die Aufnahmewinkel der benachbarten Mikrofone in fünf nichtüberlappende Segmente geteilt wird (Abb. 10.39). Unter dem Namen „Atmos 5.1“ wird die Anordnung mit einem externen Controller für Vorverstärkung und Panorama als integriertes System für Surroundaufnahmen und insbesondere für die

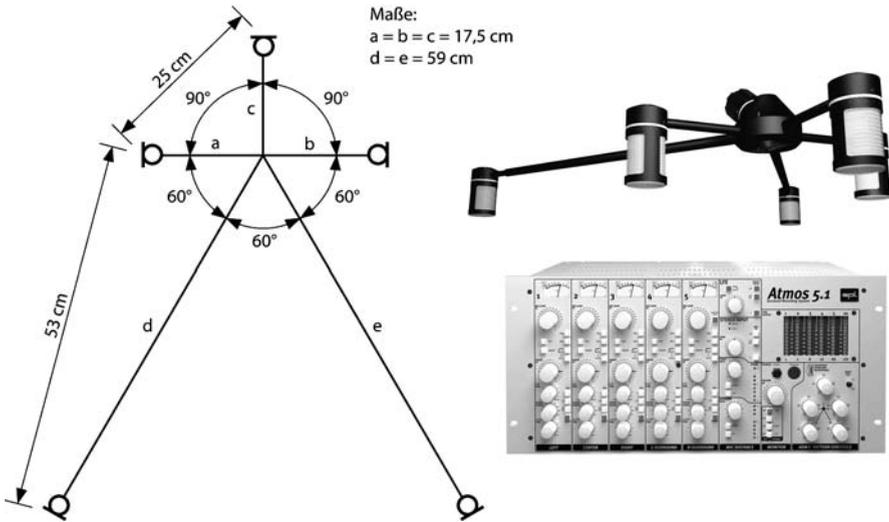


Abb. 10.39 Links: Aufnahmewinkel und Mikrofonanordnung nach INA 5. Rechts: Atmos 5.1 Mikrofonsystem mit Controller (Fotos: SPL electronics GmbH)

Atmo-Aufnahme bei Film- und Fernsehproduktionen eingesetzt. In dieser Variante sind die Richtcharakteristiken und die Ausrichtungen der Mikrofone einstellbar.

10.4.3.2 OCT

Auch die vom Münchener Institut für Rundfunktechnik vorgeschlagene OCT-Anordnung (Optimized Cardioid Triangle) für drei Frontkanäle nimmt eine Segmentierung des frontalen Schallfelds durch zwei Mikrofonpaare LC und CR vor. Durch den Einsatz von Mikrofonen mit Supernierencharakteristik für L und R wird das Übersprechen zwischen den äußeren Mikrofonen und damit die Ausbildung unerwünschter Phantomschallquellen zwischen L und R bei der Wiedergabe reduziert.

Der Aufnahmewinkel des Gesamtsystems ergibt sich aus der Mikrofonbasis zwischen L und R. Die Tiefenwiedergabe wird optional durch zwei zusätzliche, tiefpassgefilterte Druckempfänger mit Kugelcharakteristik an den Positionen von L und R verbessert. Die Anordnung kann durch zwei rückwärtig ausgerichtete Nierenmikrofone zu einem fünfkanaligen Aufnahmesystem (*OCT Surround*) ergänzt werden (Theile 2001, Abb. 10.40).

10.4.3.3 Fukada Tree

Ein ähnliches Konzept wie OCT Surround wird mit einem bei der japanischen Rundfunkgesellschaft NHK unter der Bezeichnung *Fukada Tree* praktizierten Aufnahmeverfahren mit fünf Nierenmikrofonen für die Kanäle L, R, S, LS und RS,

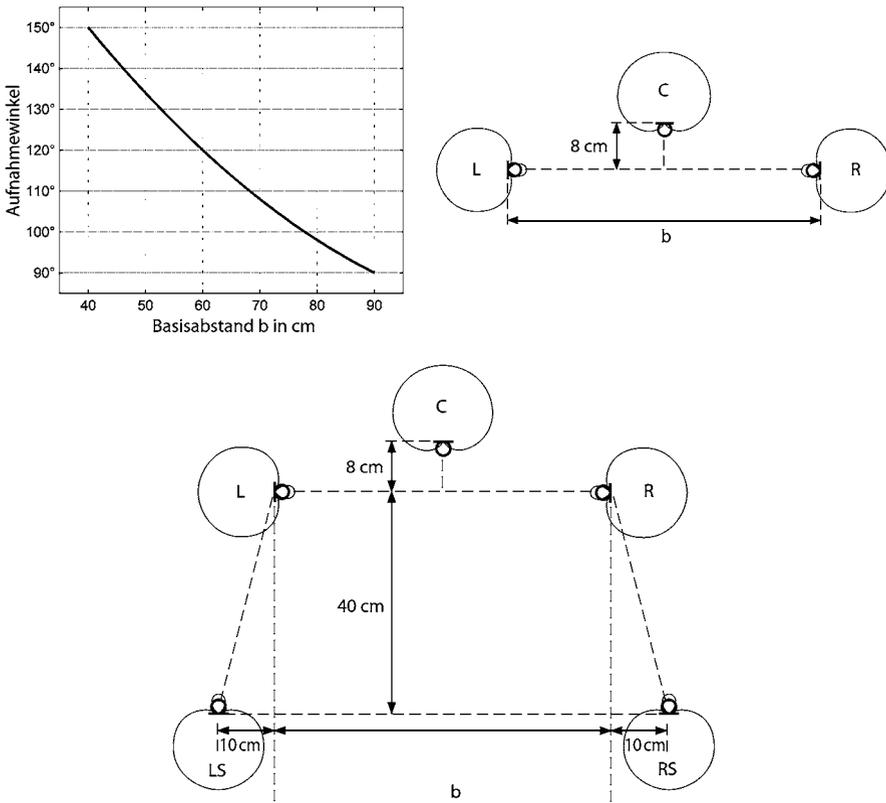


Abb. 10.40 Oben: Mikrofonkonfiguration und Aufnahmewinkel für eine OCT-Anordnung. Für L und R kommen Mikrofone mit Supernierencharakteristik zum Einsatz, für C eine Nierencharakteristik. Unten: OCT Surround mit zusätzlichen Nierenmikrofonen für LS und RS

sowie zwei zusätzlichen, weiter außen positionierten Druckempfängern verfolgt (Abb. 10.41, nach Fukada 2001).

10.4.3.4 Kugelflächenmikrofon mit Achten

Das Kugelflächenmikrofon KFM 360 ist eine Erweiterung der zweikanaligen Variante KFM 6 (s. Abschn. 10.3.4) durch zwei zusätzliche, nach vorne ausgerichtete Gradientenempfänger mit Achtcharakteristik, die neben den in die Kugeloberfläche integrierten Druckempfängern aufgesetzt sind (Bruck 1996). Durch MS-Matrizierung von Kugel und Acht auf beiden Seiten der Kugel entstehen zwei äquivalente Nierencharakteristiken. Diese zeigen nach vorne (M+S) und nach hinten (M-S) und können den Wiedergabekanälen L und LS bzw. R und RS zugeordnet werden. Ein zusätzliches Center-Signal kann aus den Stereokanälen durch eine Gerzon-Matrix gewonnen werden (Gerzon 1992).

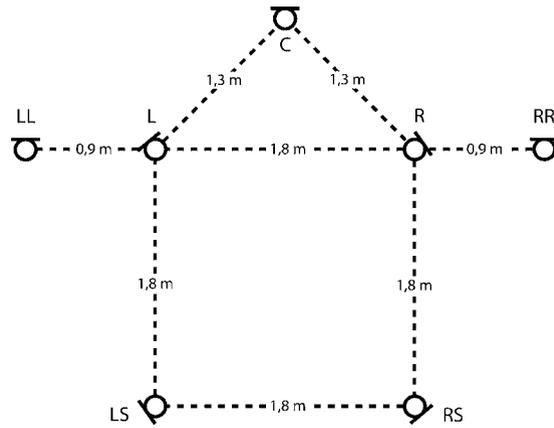


Abb. 10.41 Fukada-Tree



Abb. 10.42 Kugelflächenmikrofon KFM 360 mit aufgesetzten Gradientenempfängern in Achtcharakteristik und Steuereinheit zur Matrizierung und Entzerrung der Mikrofonensignale (Fotos: Fa. Schoeps Mikrofone)

10.4.3.5 Quadrofones Mikrofonkreuz

Eine Anordnung von vier Nierenmikrofonen an den Ecken eines Quadrates mit 20–25 cm Seitenlänge (Abb. 10.43) wurde bereits in den 1970er Jahren zur Aufzeichnung von Signalen für die quadrofone Wiedergabe verwendet. Unter der Bezeichnung *Atmo-Kreuz* oder *IRT-Kreuz* wird es vor allem für die Aufzeichnung von

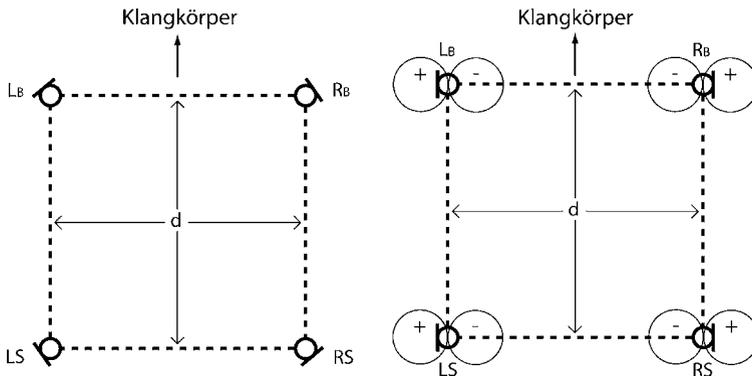


Abb. 10.43 IRT Mikrofonkreuz (links) und Hamasaki Square (rechts)

Atmo-Signalen (Publikum, Geräuschatmosphären) oder als Raummikrofon für die Aufnahme diffuser Schallanteile eingesetzt. Bei fünfkanaliger Wiedergabe werden die rückwärtigen Mikrofone den Surroundkanälen LS und RS, die nach vorne gerichteten Mikrofone den Frontkanälen L und R zugeordnet.

Eine alternative quadrofone Anordnung (*Hamasaki Square*) verwendet Achtermikrofone in einem größeren Abstand von 1 bis 3 m (Abb. 10.43). Durch die Ausrichtung der Achtermikrofone zu den Seiten wird eine maximale Unterdrückung von frontalem Direktschall erreicht, die vorteilhaft ist, wenn das System als Raummikrofon zur Aufzeichnung der Surround-Signale eingesetzt werden soll (Hamasaki et al. 2001).

10.5 Mikrofonierung und Klanggestaltung

In der technischen Akustik lassen sich weitgehend objektive Kriterien für die Auswahl elektroakustischer Wandler formulieren. So werden in der physikalischen Messtechnik überwiegend monofone Messmikrofone mit linearem Frequenzgang an definierten Punkten im Schallfeld eingesetzt. In der Psychoakustik, wo es um eine physikalisch exakte und reproduzierbare Übertragung von Ohrsignalen für Versuchspersonen in einer Laborsituation geht, etwa im Bereich der Produktentwicklung, der Lärmwirkungsforschung oder der perzeptiven Validierung raumakustischer Parameter, hat sich die binaurale Aufnahme mit einem Kunstkopfsystem als Standard etabliert.

Im Bereich der Musikproduktion existiert allerdings ein großes Spektrum an Verfahren zur Aufnahme komplexer Klangkörper wie Orchester, Chöre oder Kammermusikensembles. Diese Vielfalt lässt sich bereits äußerlich an der unterschiedlichen Anzahl der eingesetzten Mikrofone ablesen. Während die Fa. Denon für die Gesamteinspielung der Symphonien Gustav Mahlers Ende der 1980er Jahre ganz überwiegend nur zwei Mikrofone einsetzte (sog. *one-point recordings*, z. B. Denon

Co-72589-604), waren die Aufnahmen der gleichen Werke durch den Produzenten Volker Straus für das Philips-Label legendär für den Einsatz von häufig weit über 50 Mikrofonen (z. B. Philips 470 871-2). In gleicher Weise variieren die Auswahl von eingesetzten Mikrofontypen, Mikrofonpositionen und der Einsatz verschiedener stereofoner Aufnahmeverfahren. Allein diese Vielfalt an Aufnahmeverfahren, die sich auch über 50 Jahre nach Einführung der Stereophonie noch eher zu erweitern als zu reduzieren scheint, ist ein Indiz, dass offensichtlich nicht eine physikalisch exakte Schallfeldreproduktion im Vordergrund steht. Nicht erst die nachfolgende Einstellung der Klangbalance am Mischpult, sondern bereits die Wahl des Aufnahmeverfahrens ist hier eine künstlerischen Entscheidung nach ästhetischen Kriterien.

10.5.1 Hauptmikrofon versus Einzelmikrofone

Als Aufnahmeverfahren für komplexe Klangkörper stehen sich zwei gegensätzliche Ansätze gegenüber: Eine Aufnahme mit Einzelmikrofonen (*Polymikrofonie*) ordnet jeder Klangquelle ein eigenes monofones oder stereofones System zu, das hinsichtlich Mikrofontyp und Aufnahmeposition für diese Quelle optimiert ist. Das Übersprechen anderer Quellen in dieses Mikrofon wird durch die Verwendung gerichteter Mikrofone, geringe Mikrofonabstände und durch zusätzliche Maßnahmen zur akustischen Trennung im Aufnahmeraum (Trennwände, geschlossene Aufnahmekabine) weitgehend unterdrückt. Durch das bei Pop- und Rockproduktionen übliche Overdub-Verfahren, bei dem die einzelnen Stimmen sukzessive zu einer bereits vorhandenen Mischung eingespielt werden, ist das akustische Übersprechen von vornherein ausgeschaltet. Intensität, Klangcharakter und eine räumliche Abbildung werden der Schallquelle erst durch die Bearbeitung des aufgenommenen Signals, die Panoramaeinordnung und den Signalpegel bei der Mischung zugeordnet. In der Regel ist auch eine räumliche Bearbeitung durch künstlichen Nachhall erforderlich, da das Mikrofonsignal aufgrund der direkten Abnahme wenig Diffusanteil enthält. Das Verfahren erlaubt jedoch bei der Klangregie einen maximalen Gestaltungsspielraum, da jede Klangquelle eines Ensembles separat und unabhängig voneinander bearbeitet werden kann.

Die Aufnahme mit einem *Hauptmikrofon* dagegen ordnet dem gesamten Klangkörper ein zwei- oder mehrkanaliges, stereofones Aufnahmesystem zu und verzichtet im Extremfall auf die Mikrofonierung der einzelnen Quellen. Intensität, Klangcharakter und Abbildungsrichtung werden bereits bei der Aufnahme durch die Position der einzelnen Quellen relativ zum Hauptmikrofon festgelegt und entziehen sich weitgehend einer nachfolgenden Bearbeitung. Auch eine räumliche Bearbeitung durch künstlichen Nachhall ist häufig nicht erforderlich, da die einzelnen Quellen, insbesondere wenn in akustisch geeigneten Räumen aufgenommen wird, bereits mit ausreichendem Diffusanteil aufgezeichnet sind. Das Verfahren erfordert eine minimale Anzahl an Mikrofonensignalen, auch eine separate Abmischung ist nicht erforderlich. Grundgedanke ist die möglichst „unmanipulierte“ Übertragung einer im Aufführungsraum bestehenden Klangbalance.

Aufnahmen von Populärmusik oder Filmtönen (außer Atmo-Aufnahmen) werden fast ausschließlich in Einzelmikrofonie durchgeführt. Lediglich in der klassischen Musikproduktion werden beide Varianten praktiziert, begleitet von einer fortdauernden Diskussion über Vorzüge und Nachteile der beiden Ansätze. In der Praxis sind die Übergänge allerdings fließend, da auch Aufnahmen mit einem Hauptmikrofon selten ohne zusätzliche *Stützmikrofone* durchgeführt werden (s. Abschn. 10.5.3). In solchen Fällen ist es letztlich eine Frage des Mischungsverhältnisses, welche Teile des Klangkörpers überwiegend über das Hauptmikrofon oder über Einzelmikrofone abgebildet werden.

10.5.2 Klangliche Eigenschaften von Hauptmikrofonverfahren

Um zu ermitteln, in welcher Weise sich die Wahl des Aufnahmeverfahrens auf die Eigenschaften des reproduzierten Klangbilds auswirkt, wurde eine Vielzahl von Hörversuchen durchgeführt, von denen in Tabelle 10.7 nur eine Auswahl aufgeführt ist.

Dabei wurden verschiedene *Hauptmikrofonverfahren* verglichen, da eine Aufnahme mit Einzelmikrofonen überwiegend durch die Art der Abmischung bestimmt wird und sich kaum als *ein* Verfahren untersuchen lässt. Auch ein Vergleich von Hauptmikrofon-Verfahren wirft jedoch eine Reihe methodischer Probleme auf. Zum einen lässt sich das Mikrofonverfahren nur schwer unabhängig von anderen für die Abbildung wesentlichen Faktoren variieren. Auch bei Versuchen, bei denen sich die zu vergleichenden Mikrofonensysteme an der gleichen Position im Schallfeld befinden (Wöhr u. Nellessen 1986, Jacques et al. 2002), ist schwer zu entscheiden, ob die wahrgenommenen Unterschiede auf das Aufnahmeverfahren selbst oder die unterschiedlichen Direkt-Diffusverhältnisse und Aufnahmewinkel bedingt sind, die sich für unterschiedliche Systeme am gleichen Ort ergeben. Bei anderen Tests wurde jedes Verfahren von einer Expertengruppe separat klanglich optimiert (Camerer u. Sodl 2001), hier können zusätzlich unterschiedliche klanggestalterische Intentionen eine Rolle spielen. Ein weiteres methodisches Problem ist die Vorgabe von Attributen wie *Räumlichkeit* oder *Lokalisationsschärfe*, anhand derer die verschiedenen Verfahren meist bewertet werden. Diese Vorgabe unterliegt nicht nur einer gewissen Willkür, vor allem aber ist es unklar, welche Bedeutung diese Kriterien für den „Kunden“ haben, d. h. wie relevant sie für den Gesamteindruck einer Aufnahme bei Laienhörern sind.

Aufgrund der unterschiedlichen methodischen Vorgehensweise lassen sich aus den durchgeführten Versuchen kaum generalisierbare Eigenschaften einzelner Mikrofonverfahren ableiten. Auffällig ist allerdings, dass sowohl bei Vergleichen zweikanaliger Hauptmikrofone (Wöhr u. Nellessen 1986) als auch bei fünfkanaligen Hauptmikrofonen (Herrmann u. Henkels 1998, Camerer u. Sodl 2001, Jacques et al. 2002) Laufzeitverfahren gegenüber reinen Intensitätsverfahren perzeptiv besser bewertet wurden. Dies gilt für den Gesamteindruck der Aufnahme und die subjektive Präferenz, insbesondere aber für Attribute wie *Raumeindruck* (Herrmann u. Henkels 1998), *Realismus des Raums*, *räumliche Tiefe*, *Klangfarbe* und *Natürlich-*

keit (Berg 2002). Die höhere klangfarbliche Bewertung wird üblicherweise damit erklärt, dass bei Laufzeitverfahren Druckempfänger zum Einsatz kommen, die zu tiefen Frequenzen einen annähernd linearen Frequenzgang aufweisen, im Gegensatz zu den bei Intensitätsstereofonie verwendeten Gradientenempfängern. Die Bedeutung von Laufzeitunterschieden als Erklärung für die Bewertung räumlicher Attribute ist dagegen umstritten. Einerseits erzeugen hinsichtlich der interauralen Korrelation, die auch in der Raumakustik als wesentliches Kriterium für die empfundene Räumlichkeit gilt (s. Kap. 5.2.10), auch koinzident aufgezeichnete und damit hoch korrelierte *Kanalsignale* eine dem natürlichen Hören entsprechende, *interaurale* Korrelation bei der Wiedergabe über Lautsprecher (s. Kap. 3.3.4.1). Andererseits belegen die oben genannten Hörversuche, dass durch Laufzeitverfah-

Tabelle 10.7 Einige Hörversuche zur Ermittlung subjektiver Eigenschaften von zwei- und mehrkanalstereofonen Hauptmikrofonverfahren

Quelle	Aufnahmeverfahren	Aufnahme- und Wiedergabekanäle	Versuchsmethode	Subjektive Kriterien
Wöhr u. Nellessen 1986	AB, XY, MS, ORTF, OSS, Kunstkopf, KFM	2	Paarvergleich mit bipolarer, siebenstufiger Ratingskala	Gesamtpräferenz, Räumlichkeit, Lokalisation
Braun u. Hudelmayer 1996	OSS, KFM, Kunstkopf, KaeT	2	Paarvergleich mit bipolarer, fünfstufiger Ratingskala	Klangfarbe, Ortbarkeit
Herrmann et al. 1998	ABC, INA, KFM 360, MST (3-Kanal-Ambisonics), IRT Kreuz	3/5	Paarvergleich mit bipolarer, fünfstufiger Ratingskala	Raumeindruck, Lokalisation, Klang
Camerer u. Sodl 2001	Decca-Tree, OCT, Stereo + C, INA 5, KFM 360, Soundfield Microphone, Hamasaki Square	5	Paarvergleich mit bipolarer, fünfstufiger Ratingskala	Räumliche Abbildung Orchester, Klangfarbe, Räumlichkeit (insg. 9 Merkmale)
Jacques et al. 2002	OCT Surround, Williams MMA, Soundfield Microphone, Fukada-Tree, Hamsaki-Square	5	bipolare, fünfstufige Ratingskala	Raumgröße, Lokalisierungsschärfe, Tiefe und Breite des Ensembles, Realismus des Raumes, Gesamtpräferenz
Berg u. Rumsey 2002	Fukada Tree, Hamasaki Square, Decca-Tree, 3-Kanal-Koinzidenzmikrofon,	5	Repertory Grid Technique	15 im Versuch ermittelte Attribute
Berg u. Rumsey 2002	Fukada Tree, Hamasaki Square, Decca-Tree, 3-Kanal-Koinzidenzmikrofon,	5	Repertory Grid Technique	15 im Versuch ermittelte Attribute

ren aufgezeichnete Kanalsignale mit ihren von (Griesinger 2001) als *Dekorrelation*, von (Lipshitz 1985) als *Phasigkeit* bezeichneten, zusätzlichen Laufzeit- und Phasenunterschieden beim Hörer offensichtlich eine gesteigerte Empfindung von Räumlichkeit auslösen. Auch wenn diese im physikalischen Sinne nicht natürlich ist, sondern auf einer durch das Signal induzierten *Illusion* von Räumlichkeit beruht, kann sie im Ergebnis offensichtlich als *natürlicher* wahrgenommen werden.

10.5.3 Hauptmikrofone und Stützmikrofone

Bei komplexen Klangkörpern gelingt es häufig nicht, mit einem einzigen stereofonen Hauptmikrofon eine befriedigende Klangbalance zu erreichen. In diesem Fall ist der Einsatz von *Stützmikrofonen* üblich: Einzelne Instrumente werden durch ein meist in einem Abstand von 1–2 m angebrachtes Einzelmikrofon zusätzlich aufgenommen und dem Hauptmikrofon zugemischt. Die Funktion des Stützmikrofons kann sein,

- (1) die mikrofonierte Quelle in der Mischung lauter erscheinen zu lassen,
- (2) den wahrgenommenen Entfernungseindruck zur mikrofonierten Quelle zu verringern, indem dem Hauptmikrofon durch das Stützmikrofon ein (aufgrund des geringeren Mikrofonabstands) vorauseilendes Signal hinzugefügt wird,
- (3) durch das vorauseilende Signal einen aufgrund des Präzedenzeffekts dominierenden Lokalisationsreiz zu erzeugen (s. Kap. 3.4.2), der erfahrungsgemäß auch die Lokalisationsschärfe der Abbildung erhöht, und
- (4) der Klangfarbe der Quelle durch das dicht abgenommene Mikrofonsignal einen höhenbetonten Klanganteil hinzuzufügen, dadurch insbesondere hochfrequente Geräuschanteile (Anblas- bzw. Anstrichgeräusche, Atmen) hörbar zu machen und bei Gesangsstimmen und Sprechern die Textverständlichkeit zu erhöhen.

Wenn nur die Lautheit einer Quelle erhöht werden soll (1), ohne Entfernungseindruck und Lokalisation zu beeinflussen (2,3), kann es sinnvoll sein, das Signal des Stützmikrofons zeitlich zu verzögern, so dass es in der Mischung nach dem Hauptmikrofon erscheint. Die Verzögerung sollte dann so eingestellt werden, dass das Stützmikrofon *nach* den ersten Raumreflexionen erscheint, damit das räumliche Gesamtbild des Hauptmikrofons nicht beeinträchtigt wird (*Raumbezogene Stütztechnik*, Theile 1984). In der Praxis stehen jedoch häufig die Intentionen (2), (3) und (4) im Vordergrund. Hier wird ein unverzögertes Stützmikrofon bereits bei niedrigerem Signalpegel wirksam, da ein nacheilendes Mikrofonsignal tendenziell durch die in der Lautstärke dominierenden Anteile des Hauptmikrofons verdeckt wird. Abb. 10.44 zeigt eine typische Mikrofonierung für komplexe Klangkörper mit Haupt- und Stützmikrofonen.

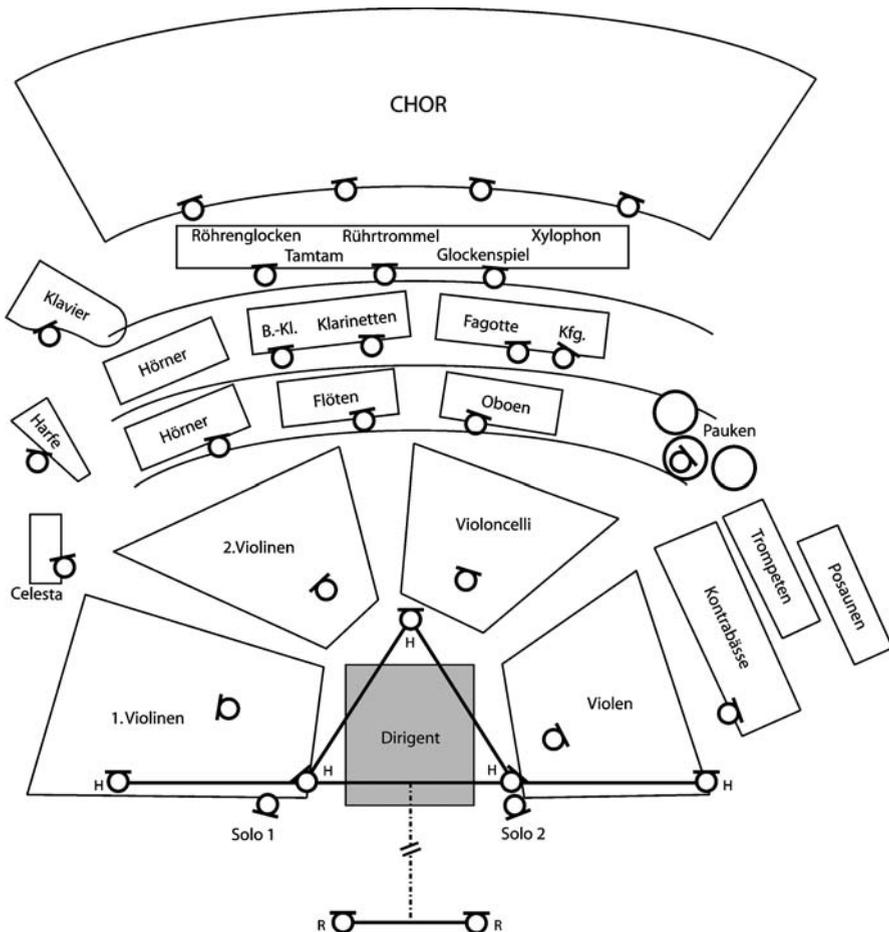


Abb. 10.44 Mikrofonierung mit Haupt- und Stützmikrofonen. Ein Decca-Tree und zwei zusätzliche Druckempfänger als Hauptmikrofon (H), dazu zwei Raummikrofone (R) und Stützmikrofone für die Solisten und alle Instrumentengruppen des Orchesters, in der Mischung 5–15 dB unter dem Pegel des Hauptmikrofons. Für die Surround-Kanäle wurden zwei Druckempfänger in 10 m Entfernung vom Orchester platziert (nicht eingezeichnet). (A. Schönberg, *Die Jakobsleiter*, DSO Berlin/Kent Nagano, veröffentlicht als SACD bei harmonia mundi HMC801821, Aufnahme teldex Studio Berlin, m. f. G. von T. Lehmann)

Normen und Standards

AES17-1998 (r2004)	AES standard method for digital audio engineering – Measurement of digital audio equipment
ANSI S3.36 (R1996)	American National Standard for a Manikin for Simulated in-situ Airborne Acoustic Measurements
DIN 45405	Störspannungsmessung in der Tontechnik
DIN 45406:1966	Aussteuerungsmesser für elektroakustische Breitbandübertragung (zurückgezogen 2000)
DIN 45510	Magnettontechnik. Begriffe
DIN V 45608	Vorläufiger Kopf- und Rumpfsimulator für akustische Messungen an Luftleitungs-Hörgeräten (identisch mit IEC 60959)
DIN EN 60268-3:2000	Elektroakustische Geräte – Teil 3: Verstärker
DIN EN 60268-4:2004	Elektroakustische Geräte – Teil 4: Mikrofone
DIN IEC 60268-10	Spitzenspannungs-Aussteuerungsmeßgerät
DIN IEC 60268-17	Standard-vu-Meter
DIN EN 61672	Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen
IEC 60268-18	Spitzenspannungs-Aussteuerungsmeßgeräte – Spitzenspannungsmeßgerät für digitalen Ton
IEC TR 60959:2000	Provisional head and torso simulator for acoustic measurements on air conduction hearing aids
DIN EN 61260	Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven
EBU R68	EBU Technical Recommendation R68-2000. Alignment level in digital audio production equipment and in digital audio recorders
ISO 9613-1:1993	Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere
ITU-R BS.775-1:1994	Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture
ITU-R BS.1770	Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level
ITU-T J.27	Signals for the Alignment of International Sound-Programme Connections
ITU-T P.58	Head and torso simulator for telephony
SMPTE RP155-2004	SMPTE Recommended Practices for Motion Pictures and Television – Reference Level for Digital Audio Systems

Literatur

- Alexander RC (1999) *The Inventor of Stereo: The Life and Works of Alan Dower Blumlein*. Focal Press, Boston
- Ballou GM (2002) *Handbook for Sound Engineers*. 3. Aufl, Focal Press, Boston
- Bartlett B, Billingsley M (1990a) An Improved Stereo Microphone Array Using Boundary Technology: Theoretical Aspects. *J Audio Eng Soc* 38/7/8:543–552
- Bartlett B, Billingsley M (1990b) Practical Field Recording Applications: An Improved Stereo Microphone Array Using Boundary Technology. *J Audio Eng Soc* 38/7/8:553–565
- Berg J (2002) Evaluation of perceived spatial quality of 5-channel microphone techniques by using selected spatial attributes. 22. Tonmeistertagung, Hannover
- Berg J, Rumsey F (2002) Validity of selected spatial attributes in the evaluation of 5-channel microphone techniques, 112th AES Convention, Munich, Preprint 5593
- Blumlein AD (1931) British Patent 394325 (1933 June 14). Reprinted in *J Audio Eng Soc* 6 (1958):91–98
- de Boer K (1940) Plastische Klangwiedergabe. *Philips Technische Rundschau* 5/4:108–115
- Brixen EB (2001) *Audio Metering*. Broadcast Publishing & DK Audio A/S, Denmark

- Bruck J (1996) Die Lösung des "Surround"-Dilemmas. In: 19. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1996, Bericht, S 117–124
- Burns RW (2000). The Life and Times of A. D. Blumlein. IEE History of Technology series.
- Breh K (1986) Alles Clara. Test eines neuen Aufnahmesystems. **Stereoplay** 4:46–48
- Camerer F, Sodl C (2001) Classical Music in Radio and TV – a multichannel challenge. <http://www.hauptmikrofon.de>
- Christensen F, Martin G, Minnaar P, Song WK, Pedersen B, Lydolf M (2005) A Listening Test System for Automotive Audio – Part 1: System Description. 118th AES Convention, Barcelona, Preprint 6358
- Damaske P, Wagner B (1969) Richtungshörversuche über einen nachgebildeten Kopf. **Acustica** 21:30–35
- Defossez A (1986) Stereophonic Pickup System Using Baffled Pressure Microphones. 80th AES Convention, Preprint 2352
- Dickreiter M (1997) Handbuch der Tonstudioteknik. Bd 1, 6. Aufl, Saur Verlag, München
- Dickreiter M (2003) Mikrofon-Aufnahmetechnik, 3. Aufl, Hirzel Verlag, Stuttgart
- Farrar K (1979a) Soundfield Microphone. Design and development of microphone and control unit. **Wireless World** 85:48–50
- Farrar K (1979b) Soundfield Microphone – 2. Detailed functioning of control unit. **Wireless World** 85:99–103
- Franssen NV (1963) Stereophonie. **Philips Technische Bibliothek, Eindhoven**
- Friesecke A (2003) Metering. Studio-Anzeigen lesen und verstehen, PPVMedien, Bergkirchen
- Fukada A (2001) A challenge in multichannel music recording. 19th AES International Conference, Paper 1881
- Gernemann A (2002) „DECCA-Tree“ – gestern und heute. In: 22. Tonmeistertagung, Hannover. Bericht, o S
- Gerzon MA (1975) The Design of Precisely Coincident Microphone Arrays for Stereo and Surround Sound. 50th AES Convention, London, Preprint L20
- Gerzon MA (1992) Optimum Reproduction Matrices for Multispeaker Stereo, **J Audio Eng Soc** 40/7:571–589
- Geyersberger S (1990) Das Kugelflächenmikrofon – ein neues Stereo-Hauptmikrofon. In: 16. Tonmeistertagung, Karlsruhe, Bericht, S 684–689
- Gierlich HW (1992) The Application of Binaural Technology. **Applied Acoustics** 36:219–243.
- Girod B, Rabenstein R, Stenger A (2003) Einführung in die Systemtheorie. 2. Aufl, Teubner Verlag, Wiesbaden
- Görne T (2004) Mikrofone in Theorie und Praxis. 7. Aufl, **Elektor Verlag**
- Griesinger D (2001) The Psychoacoustics of Listening Area, Depth, and Envelopment in Surround Recordings, and their relationship to Microphone Technique. AES 19th International Conference, Paper 1913
- Hamasaki K, Shinmura T, Akita S, Hiyama K (2001) Approach and Mixing Technique for Natural Sound Recording of Multichannel Audio. AES 19th International Conference, Paper 1878
- Hammershøi D, Møller H (2002) Methods for Binaural Recording and Reproduction. **Acta Acustica United with Acustica** 88:303–311
- Hansen K (1996) Objective Reading of Loudness of a Sound Programme. 100th AES Convention, Kopenhagen, Preprint 4165
- Herrmann U, Henkels V, Braun D (1998) Vergleich von 5 Surround-Mikrofonverfahren. In: 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe, Bericht, S 508–517
- Braun D, Hudelmayer C (1996) Vier verschiedene Verfahren der Trennkörperstereophonie. 19. Tonmeistertagung, Karlsruhe, Bericht, S 424–434
- Jacques R, Fleischer M, Fuhrmann S, Steglich B, Reiter U, Kutschbach H (2002) Empirischer Vergleich von Mikrofonierungsverfahren für 5.0 Surround. 22. Tonmeistertagung, Hannover. Bericht
- Jakubowski H (1984) Aussteuerungsmessung in der digitalen Tonstudioteknik. **Rundfunktechnische Mitteilungen** 28/5:213–219
- Jecklin J (1981) A Different Way to Record Classical Music. **J Audio Eng Soc** 29:329–332
- Kürer R, Plenge G, Wilkens H (1969) Correct Spatial Sound Perception Rendered by a Special 2-Channel Recording Method. 37th AES Convention, Preprint 666
- Leakey DM (1960) Further thoughts on stereophonic sound systems. **Wireless World** 66:154–160

- Lehmann P, Wilkens H (1980) Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien. *Acustica* 45:256–68
- Lindau A, Weinzierl S (2007) FABIAN – Schnelle Erfassung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. *Fortschritte der Akustik, DAGA Stuttgart*
- Lipshitz SP (1985) Stereo Microphone Techniques : Are The Purists Wrong? 78th AES Convention, Anaheim, Preprint 2261
- Mertens H (1965) Directional hearing in stereophony – Theory and experimental verification. E.B.U. Review – Part A – Technical 92:146–158
- Minnaar P, Olesen SK, Christensen F, Møller H (2001) Localization with Binaural Recordings from Artificial and Human Heads. *J Audio Eng Soc* 49:323–336
- Moldrzyk C, Ahnert W, Feistel S, Lentz T, Weinzierl S (2004) Head-Tracked Auralization of Acoustical Simulation, 117th AES Convention Paper, San Francisco, Preprint 6275
- Pawera N (2004) *Mikrofonpraxis. Tipps und Tricks für Bühne und Studio; Technik, Akustik und Aufnahmepraxis für Instrumente und Gesang*. 5. Aufl, PPV Medien, Bergkirchen
- Pizzi S (1984) Stereo Microphone Techniques for Broadcast. 76th AES Convention, Preprint 2146
- Ribbeck B, Schwarze D (1965) Korrelation von Stereo-Signalen und ihre Anzeige. *Internationale Elektronische Rundschau* 19/6:317–320
- RTW (2005) Die Lautheitsanzeige im RTW Aussteuerungsmesser. *Application Note 10/2005*
- Simonsen G (1984) Masterarbeit, Lyngby, Dänemark, zit. nach Williams M (1987) Unified theory of microphone systems for stereophonic sound recording. 82nd AES Convention, Preprint 2466
- Skovenborg E, Nielsen SH (2004) Evaluation of Different Loudness Models with Music and Speech Material. 117th AES Convention, San Francisco, Preprint 6234
- Soulodre GA, Norcross SG (2003) Objective Measures of Loudness. 115th AES Convention, New York, Paper 5896
- Soulodre GA (2004) Evaluation of Objective Loudness Meters. 116th AES Convention, Berlin, Preprint 6161
- Spikofski G, Klar S (2004) Levelling and Loudness – in radio and television broadcasting. EBU Technical Review
- Streicher R, Dooley W (1984) Basic Stereo Microphone Perspectives. *A Review*. 2nd AES International Conference, Anaheim, Preprint C1001
- Theile G (1981) Zur Kompatibilität von Kopfsignalen im intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Klangfarbe. *Rundfunktechn Mitteilungen* 25/4:146–154
- Theile G (1984) Hauptmikrofon und Stützmikrofone – neue Gesichtspunkte für ein bewährtes Aufnahmeverfahren. In: 13. Tonmeistertagung, München, Bericht, S 170–184
- Theile G (1986) Das Kugelflächenmikrofon. In: 14. Tonmeistertagung, München, Bericht, S 277–293
- Theile G (2001) Natural 5.1 Music Recording Based on Psychoacoustic Principles. 19th AES International Conference, Paper 1904
- Wendt K (1964) Das Richtungshören bei Zweikanal-Stereophonie. *Rundfunktechnische Mitteilungen* 8/3:171–179
- Wilkens H (1972) Kopfbezügliche Stereophonie – ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke. *Acustica* 26:213–221
- Williams M (1987) Unified theory of microphone systems for stereophonic sound recording. 82nd AES Convention, Preprint 2466
- Williams M, Le Dû G (1999) Microphone Array Analysis for Multichannel Sound Recording. 107th AES Convention, New York, Preprint 4997
- Wilms HAO (1977) VU- vs. PPM-Indicators: The End of a Continuing Misunderstanding. 56th AES Convention, Preprint 1221
- Wittek H, Theile G (2002) The recording angle – based on localisation curves. 112th AES Convention, München, Paper 5568
- Wöhr M, Nellessen B (1986) Untersuchungen zur Wahl eines Hauptmikrofonverfahrens. In: 14. Tonmeistertagung München, Bericht, S 106–120
- Wuttke J (1992) Zwei Jahre Kugelflächenmikrofon. In: 17. Tonmeistertagung, Karlsruhe, Bericht, S 832–841
- Wuttke J (2001) General Considerations on Audio Multi-Channel Recording. 19th AES International Conference, Paper 1892