

Zur Frage der Auswirkung von Pegel- und Phasendifferenzen zwischen zwei Stereokanälen

DK 681.84.087.7

Von W. HOEG und P. ARNOLD, Berlin
(Rundfunk- und Fernsehtechnisches Zentralamt)

In der Stereophonie-Übertragungstechnik spielen Pegel- und Phasendifferenzen zwischen zwei einander zugeordneten Stereokanälen eine große Rolle, besonders dann, wenn im Zuge des Übertragungsweges Umsetzungen der Signale erforderlich sind.

Der Beitrag gibt an Hand mathematischer Betrachtungen einen Überblick über die Zusammenhänge bei der Intensitätsstereophonie bezüglich des Einflusses von Pegel- und Phasendifferenzen auf das endgültige stereofone bzw. monofone (kompatible) Klangbild.

В стерео-передающей технике играют большую роль разности фаз и уровней между двумя друг к другу расположенными стереоканалами, в особенности тогда, если в ходе пути передачи необходимы преобразования сигналов.

Эта статья даёт при помощи математических рассмотрений обзор о связи при стереофонии интенсивности относительно влияния разности уровня и фазы на окончательное стереофоническое или монофоническое (совместимое) звучание.

In stereophonic transmission techniques a major part is played by level and phase differences between related stereo channels, especially if within the transmission path signal conversions are necessary. By means of mathematical considerations the present paper gives a survey of the relations existing in intensity stereophony as a function of the influence of level and phase differences on the final stereophonic or monophonic (compatible) sound pattern.

1. Einleitung

Die stereofone Übertragungstechnik verwendet im wesentlichen zwei Aufnahmeverfahren, und zwar das mit distanzierten Mikrofonen arbeitende A/B-Verfahren (Ausnutzung von Laufzeit und Intensitätsunterschieden), sowie das X/Y- bzw. M/S-Verfahren (reine Intensitätsstereophonie), bei dem sogenannte Koinzidenzmikrofone¹⁾ benutzt werden. Ausführliche Zusammenfassungen über die Grundlagen der stereofonen Schallübertragung und der bei der Zweikanalstereophonie angewandten Aufnahmeverfahren wurden u. a. in [1, 2], veröffentlicht, so daß hier zum besseren Verständnis der folgenden Betrachtungen nur die wichtigsten Punkte noch einmal angedeutet werden sollen.

Aus Gründen der besseren Kompatibilität²⁾, die für eine stereofone Rundfunkübertragung Voraussetzung sein muß, um den monofon empfangenden Hörer, der mit seinem traditionellen Empfänger die Summe der beiden Stereokomponenten erhält, nicht zu benachteiligen, wird beim Rundfunk die Anwendung der Intensitätsstereophonie bevorzugt [3, 4]. Wie schon erwähnt, werden für die Intensitätsstereophonie-Aufnahmetechnik Koinzidenzmikrofone verwendet.

Im Falle der X/Y-Technik bestehen diese aus zwei Richtmikrofonkapseln gleicher Übertragungseigenschaften (Frequenzgang, Richtcharakteristik, Übertragungsmaß), deren Hauptempfangsrichtungen in einem bestimmten Winkel zueinander stehen. Die von den beiden Mikrofonen abgegebenen Spannungen stellen dann die beiden Stereoinformationen X und Y bzw. L und R dar, die am Wiedergabeort von den beiden Lautsprechern abgestrahlt werden.

Bei der M/S-Technik wird ein M- (Mitten-) und ein S- (Seiten-) Signal aufgenommen. Das M-Mikrofon (meist Kugel- oder Nierencharakteristik) gibt die gleiche Information wie ein entsprechendes Mikrofon der Einkanaltechnik ab, also das sogenannte kompatible M-Signal. Ein zweites Mikrofon (Acht-

Charakteristik, Hauptempfangsrichtung senkrecht zu der des ersten Mikrofons) liefert das zusätzliche Seitensignal, das sozusagen die Richtungsinformation enthält.

Ein wesentliches Merkmal der Intensitätsstereophonie besteht nun darin, daß sich die X/Y- und M/S-Signale durch elektrische Addition bzw. Subtraktion ineinander überführen lassen:

$$\begin{aligned} X + Y &\longrightarrow M \\ X - Y &\longrightarrow S \\ \text{bzw. } M + S &\longrightarrow X \\ M - S &\longrightarrow Y \end{aligned}$$

Diese Operation, die als Umsetzung (bzw. Wandlung oder Matrixierung) bezeichnet wird, kann z. B. mit sogenannten Differentialübertragern durchgeführt werden.

Man kann sich nun nicht von vornherein auf eine bestimmte Aufnahmetechnik (bezüglich M/S- oder X/Y-Mikrofon) festlegen. Die bisherige Erfahrung läßt vielmehr erkennen, daß sich — wie auch in der Einkanaltechnik — für die verschiedenen Anwendungsfälle jeweils bestimmte Mikrofontypen als günstig erweisen werden. Aus diesem Grunde muß man damit rechnen, daß je nach dem verwendeten Mikrofontyp und der in der Regieeinrichtung angewandten Mischtechnik (M/S oder X/Y) im Verlaufe der Mikrofonkette eine mehrmalige Umsetzung der beiden Stereosignale vorgenommen werden muß.

Abb. 1 zeigt zwei mögliche Ausführungen der Regiekette, um die oben beschriebene Notwendigkeit von Umsetzungen zu veranschaulichen. Die nähere Beschreibung einer Anlage, die nach dem Prinzip der in Abb. 1a angedeuteten Kette aufgebaut ist, wird in [5] gegeben. Dort sind auch Hinweise zu finden, wie die an den M/S-Weg gestellten Bedingungen mit geeigneten Mitteln erfüllt werden können.

Der Übertragungsweg zwischen Hauptverstärkerausgang über Schallspeicherung (Magnettongerät), Kontrollraum, Sendeweg zwischen Funkhaus und Sender (Leitung oder Richtfunkstrecke) bis zum Ausgang der Modulationsübergabeeinrichtung wird konsequent in X/Y-Technik angelegt, da diese Übertragungsglieder unmöglich auf die für eine einwandfreie Übertragung von M/S-Signalen erforderlichen Toleranzen bezüglich Amplituden- und Phasendifferenzen gebracht werden können. Eine letzte Umsetzung ist jedoch noch erforderlich am Eingang des zwischen Modulationsübergabeeinrichtung und Sender befindlichen Stereo-Coders, dessen Modulator bei den meisten Verfahren mit M/S-Signalen gespeist werden muß,

¹⁾ Ein Koinzidenzmikrofon besteht aus einem Paar sehr dicht beieinander angeordneter Mikrofone, so daß Laufzeitdifferenzen zwischen den beiden Kapseln von einer gegebenen Schallquelle vernachlässigt werden können.

²⁾ Definition: Kompatibilität bedeutet „Verträglichkeit“ zweier Systeme (monofon und stereofon) miteinander. Darunter versteht man die Möglichkeit, aus einer stereofonen Schallaufnahme durch Addition der beiden Stereoinformationen eine technisch und künstlerisch vollwertige monofone Aufnahme zu gewinnen, die nicht schlechter als eine unter optimalen Verhältnissen der Monophonie entstehende Aufnahme sein darf. In der Anwendung bedeutet das also, daß bei einem stereofon ausgestrahlten Programm mit einem normalen Rundfunkgerät eine optimale monofone Wiedergabe entsteht,

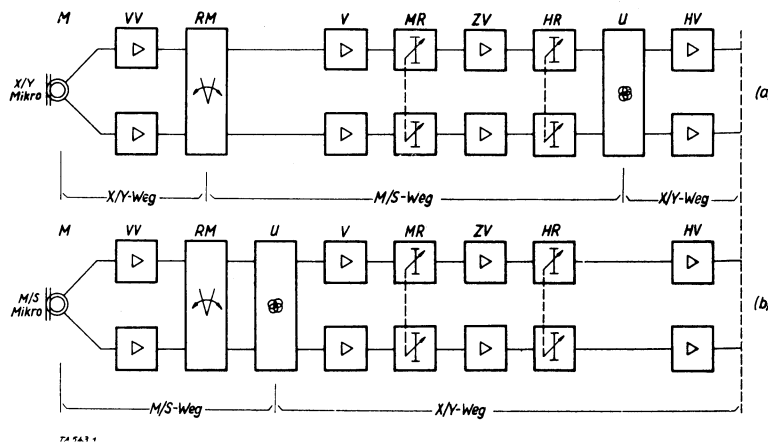


Abb. 1 Prinzipdarstellungen für Regieketten in Stereotechnik

- M Koinzidenzmikrofon
- VV Vorverstärker
- RM Richtungsmischer (hier nur mit M/S-Ausgang)
- V (Entdämpfungs-) Verstärker
- MR Mikrofonregler
- ZV Zwischenverstärker (Knotenpunktverstärker, Sammelschiene o. ä.)
- HR Hauptregler
- U Umsetzer (z. B. Differentialübertrager)
- HV Hauptverstärker

Diese Vorbemerkungen sollten als Grundlage für die folgenden Betrachtungen vorausgeschickt werden, um den Berechnungen einen realen Hintergrund zu geben, mit deren Hilfe versucht wird, die Zusammenhänge zwischen Pegel- und Phasendifferenzen, dem Übersprechen zwischen den Stereokanälen sowie zwischen dem resultierenden stereofonen Klangbild einerseits und dem kompatiblen monofonen Klangbild andererseits zu zeigen.

2. Festlegungen.

Um innerhalb der Übertragungskette eindeutige Verhältnisse zu garantieren, wurden verschiedene Festlegungen getroffen, die kurz angeführt werden sollen, soweit sie das behandelte Thema betreffen:

- X³⁾ Linkes Stereosignal (entspricht L bei der Wiedergabe)
- Y³⁾ Rechtes Stereosignal (entspricht R bei der Wiedergabe)
- M Summe aus linkem und rechtem Signal (Mittensignal bzw. kompatibles Monosignal)
- S Differenz aus linkem und rechtem Signal (Seitensignal bzw. Richtungssignal).
- X bzw. M werden dem Kanal I zugeordnet, Y bzw. S dem Kanal II.

Außerdem werden folgende Abkürzungen benutzt:

- $k = \frac{U_{\text{stör}}}{U_{\text{nutz}}}$ Übersprechfaktor (linear bzw. prozentual), das Verhältnis von Störspannung zu Nutzspannung
- $b_u = 20 \lg \frac{U_{\text{stör}}}{U_{\text{nutz}}}$ Übersprechdämpfung (logarithmisch in dB), als positive Dämpfung definiert
- $\delta = \frac{U_2 - U_1}{U_2}$ Differenzfaktor (linear bzw. prozentual) (U_1, U_2 beliebige Spannungen)
- $\Delta p = 20 \lg \frac{U_1}{U_2}$ Pegeldifferenz (logarithmisch, in dB)

An dieser Stelle sollen die bei einer Umsetzung auftretenden Pegelverhältnisse erläutert werden. Nach obigen Festlegungen ergibt sich unter Beachtung eines Proportionalitätsfaktors \ddot{u} (Übersetzungsverhältnis)

$$M = \ddot{u} (X + Y) \tag{1}$$

$$S = \ddot{u} (X - Y) \tag{2}$$

Zu betrachten sind nun die beiden Extremfälle:

- a) es ist nur ein Signal vorhanden, z. B. das Signal X: Nach (1) folgt

$$M_1 = \ddot{u} \cdot X, \quad S_1 = \ddot{u} \cdot Y$$

³⁾ Das CCIR bezeichnet (gemäß Dok. 2154-E vom 1. 2. 1963 und Dok. 2382-E vom 10. 2. 1963) die Links/Rechts-Signale immer mit A und B. Da aber andererseits unter A/B-Technik die Aufnahmemethode mit distanzierten Mikrofonen verstanden wird, haben wir uns entschlossen, die symmetrischen, durch die Anlage laufenden Stereo-Teil-Signale mit X und Y zu bezeichnen, die am Ausgang des Regiepultes (z. B. nach zweimaliger Umsetzung in X' und Y') die Links/Rechts- (L/R-) Signale darstellen.

- b) Es sind zwei Signale X und Y gleicher Amplitude und Phase vorhanden. Dann erhält man bei der Umsetzung

$$M_2 = \ddot{u} (X + Y) = 2 \ddot{u} X, \quad S_2 = \ddot{u} (X - Y) = 0$$

Praktisch bedeutet das bei einem Übersetzungsverhältnis von $\ddot{u} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ und einem X/Y-Eingangspiegel von jeweils + 6 dB

$$a) M_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (X) \hat{=} + 3 \text{ dB}$$

$$b) M_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (X + Y) \hat{=} + 9 \text{ dB}$$

Das M-Signal kann also um ± 3 dB vom Pegel des Eingangssignals abweichen, je nachdem, ob nur eines oder beide Signale (X und Y) anliegen.

Dies gilt analog für das S-Signal, wenn eine Phasendifferenz von 180° zwischen X und Y vorliegt. Die Rechnung erscheint trivial, es zeigt sich aber in der Praxis, daß dieser Fakt oft Verwirrung auslöst.

Nach der Rückumsetzung entstehen infolge des gewählten Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ wieder die Pegelverhältnisse der Eingangsspannung.

3. Zusammenhang zwischen Pegel- und Phasendifferenzen und dem Übersprechen bei der Umsetzung von Stereosignalen

3.1. Einfluß einer zweimaligen idealen Umsetzung auf zwei gegebene X/Y-Stereo-Signale

Es seien (kohärente) X/Y-Signale gegeben, die einer zweimaligen Umsetzung unterworfen werden sollen. Entsprechend den Festlegungen gilt also für die erste Wandlung

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} (X + Y) \tag{3}$$

und

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} (X - Y) \tag{4}$$

Die darauffolgende M/S-Kette soll als ideal angesehen werden, d. h. mit vernachlässigbaren Pegel- und Phasendifferenzen. Dann erhält man nach einer zweiten Wandlung (Rückumsetzung)

$$X' = \frac{1}{\sqrt{2}} (M + S) \tag{5}$$

$$= \frac{1}{2} (X + Y + X - Y)$$

$$\underline{X' = X}$$

und analog

$$Y' = \frac{1}{\sqrt{2}} (M - S) \tag{6}$$

$$\underline{Y' = Y}$$

Durch eine zweimalige Umsetzung unter idealen Voraussetzungen tritt also (definitionsgemäß) keine Signalbeeinflussung ein.

Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man bei den Eingangssignalen (X_1, Y_1) schon ein gewisses Übersprechen voraussetzt:

$$\begin{aligned} X_1 &= X + k_{YX}Y \\ Y_1 &= Y + k_{XY}X \end{aligned}$$

(k = Übersprechfaktor; bei unsymmetrischem Übersprechen

$$\begin{aligned} k_{XY}: & \text{Übersprechen von X nach Y} \\ k_{YX}: & \text{Übersprechen von Y nach X} \end{aligned}$$

Die Matrizierung ergibt

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{\sqrt{2}}(X_1 + Y_1) \\ S &= \frac{1}{\sqrt{2}}(X_1 - Y_1) \end{aligned}$$

Nach der Rückmatrizierung erhält man

$$\begin{aligned} X'_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(M + S) \\ &= \frac{1}{2}(2X + 2k_{YX}Y) \end{aligned}$$

$$X = \frac{X + k_{YX}Y}{2}$$

und

$$\begin{aligned} Y'_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(M - S) \\ Y_1 &= \frac{Y + k_{XY}X}{2} \end{aligned}$$

Durch die zweimalige Umsetzung wird also an den Eingangssignalen nichts geändert, wenn die Umsetzer selbst sowie die dazwischen liegende M/S-Kette ideal ausgelegt sind. Da mit zwei verschiedenen Übersprechfaktoren (k_{XY} und k_{YX}) gerechnet wurde, gilt dieses Ergebnis auch für ein unsymmetrisches Übersprechen.

3.2. Einfluß einer Signaländerung im M/S-Weg

Läßt man eine Pegeldifferenz ΔS im M/S-Weg zu, so werden die resultierenden X/Y-Signale in folgender Weise beeinflusst:

$$\begin{aligned} M' &= M \\ S' &= S(1 - \delta) \quad (\delta = \text{Differenzfaktor}), \end{aligned}$$

wobei M und S durch Umsetzung entsprechend Gleichung (3) und (4) entstanden sind. Die Rückumsetzung ergibt

$$\begin{aligned} X' &= \frac{1}{\sqrt{2}}(M' + S') \\ &= \frac{1}{2}[(X + Y) + (X - Y)(1 - \delta)] \\ X' &= X - \frac{\delta}{2} \cdot (X - Y) \end{aligned} \quad (7)$$

und analog

$$\begin{aligned} Y' &= \frac{1}{\sqrt{2}}(M' - S') \\ Y' &= Y + \frac{\delta}{2} \cdot (X - Y) \end{aligned} \quad (8)$$

X' und Y' enthalten unerwünschte Komponenten des jeweiligen Nachbarsignals, es tritt also ein Übersprechen auf. Das bedeutet z. B. für den Fall $Y = 0$, d. h. wenn nur die linke Information vorhanden ist:

$$\begin{aligned} X' &= X - \frac{\delta}{2} X \\ Y' &= \frac{\delta}{2} X \end{aligned} \quad (9)$$

Es entsteht also eine Basiseneigung, da auch der rechte Lautsprecher einen Teil der X-Modulation erhält und der Fall einer extremen Seiteninformation nicht mehr verwirklicht werden kann.

Eine Pegeldifferenz im M/S-Weg ruft demzufolge ein Übersprechen im darauffolgenden X/Y-Weg und dadurch eine Basiseneigung des resultierenden Klangbildes hervor.

Dieser Effekt wird z. B. bei der Richtungsbeeinflussung mit einem Richtungsmischer ausgenutzt, um eine künstliche Basisveränderung zu erzielen.

Mit Hilfe der Gleichung (9) läßt sich ohne weiteres angeben, wie groß eine zulässige Pegeldifferenz im M/S-Weg sein darf, um ein bestimmtes Übersprechen zwischen X und Y nicht zu überschreiten:

Für den Fall $M = S$, d. h. $Y = 0$ ergibt sich aus Gleichung (9)

$$\begin{aligned} \frac{X'}{Y'} &= \frac{X - \frac{\delta}{2} X}{\frac{\delta}{2} X} = \frac{2 - \delta}{\delta} \\ b_u &= 20 \lg \frac{X'}{Y'} = 20 \lg \frac{2 - \delta}{\delta}, \end{aligned} \quad (10)$$

wobei der Zusammenhang zwischen dem Differenzfaktor δ und der meßbaren Pegeldifferenz Δp durch

$$\Delta p/\text{dB} = 20 \lg \frac{S}{S(1 - \delta)} = 20 \lg \frac{1}{1 - \delta} \quad (11)$$

gegeben ist (s. auch 3.4.).

Tabelle 1

$\Delta p/\text{dB}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
b_u/dB	45	39	35	33	31

Die in Tabelle 1 dargestellten Werte aus Gleichung (10) zeigen, daß an die Pegelgleichheit einer MS-Kette sehr hohe Forderungen gestellt werden müssen, um erträgliche Übersprechwerte zu erhalten.

3.3. Einfluß eines Übersprechens im M/S-Weg auf die Ausgangssignale X und Y

Zwischen den Wegen M und S soll nun ein Übersprechen eingeführt werden, wobei $k_1 = k_{SM}$ das Übersprechen von S auf M und $k_2 = k_{MS}$ das Übersprechen von M auf S kennzeichnet. Es wird dann

$$\begin{aligned} M' &= M + k_1 S \\ S' &= S + k_2 \cdot M \end{aligned}$$

und mit Gleichung (5) und (6)

$$X' = \frac{M + k_1 S + S + k_2 M}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

Nach elementarer Umformung ergibt sich

$$X' = \frac{1}{2} [X(2 + k_1 + k_2) - Y(k_1 - k_2)] \quad (13)$$

und analog

$$\begin{aligned} Y' &= \frac{M + k_1 S - S - k_2 M}{\sqrt{2}} \\ Y' &= \frac{1}{2} [X(k_1 - k_2) + Y(2 - k_1 - k_2)] \end{aligned} \quad (14)$$

Für ein symmetrisches Übersprechen ($k_1 = k_2 = k$) erhält man

$$X' = X + k X$$

und

$$Y' = Y - k Y$$

d. h. es findet eine Mittenverschiebung statt. Ein Übersprechen im M/S-Weg von $k = 0,1$ (entspricht $b_u = 20 \text{ dB}$) ergibt bei

gleichen Ausgangssignalen $X = Y$ eine Pegeldifferenz von

$$\frac{X'}{Y'} = \frac{1+k}{1-k} \approx 1+2k, \text{ für } k \ll 1$$

$$\Delta p \approx 2 \text{ dB}$$

was eine Auswanderung des Mittensignals um etwa 5° – 6° bedeutet.

Bei einem unsymmetrischen Übersprechen ($k_1 \neq k_2$) entsteht im X/Y-Signal zusätzlich ein Übersprechen zwischen X und Y (und damit eine Baseinengung, siehe 3.2.), da die Signale X' und Y' dadurch auch Komponenten des jeweiligen Nachbarsignals enthalten [(s. Gl. (13) und (14)].

3.4. Exakte Berechnung der resultierenden Übersprechdämpfung im X|Y-Weg in Abhängigkeit von Pegel- und Phasendifferenzen im M|S-Weg

Die Ableitung von exakten Formeln, die beide Arten von Fehlern berücksichtigen, wurde bereits beschrieben in [6], so daß es genügt, hier nur noch einmal das Ergebnis anzugeben:

$$b_u = 10 \log \frac{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$= 10 \log \frac{1 + \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 + 2\frac{a_2}{a_1} \cos \Delta \varphi}{1 + \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 - 2\frac{a_2}{a_1} \cos \Delta \varphi} \text{ dB}$$

mit dem Ansatz $M = a_1 \hat{M} \cos(\omega t - \varphi_1)$
 $S = a_2 \hat{S} \cos(\omega t - \varphi_2)$

Eine kurvenmäßige Auswertung ist in Abb. 2 zu ersehen. Die von Funk angegebene Näherungsformel

$$b_u \approx 20 \log \frac{1}{\sqrt{10^{-b_{u1}/10} + 10^{-b_{u2}/10}}} \text{ dB,}$$

wobei

$$10^{-b_{u1}/10} \approx \left(\frac{\Delta a}{2a_1}\right)^2 \text{ mit } \Delta a = a_2 - a_1$$

und

$$10^{-b_{u2}/10} \approx \frac{(\overline{\Delta \varphi})^2}{2} \text{ (}\overline{\Delta \varphi} \text{ in Bogenmaß)}$$

gilt bis zu Werten von $\Delta a \leq 25\% \approx 2 \text{ dB}$

bzw. $\Delta \varphi \leq 60^\circ$,

wenn man einen Fehler von $\Delta b_u \leq \pm 1 \text{ dB}$ zuläßt.

Im Labor durchgeführte Messungen mit Differentialübertragern bestätigen die Berechnungen nach [6].

4. Addition von Übersprechwerten im Verlauf der Kette

Die folgenden Berechnungen bzw. Abschätzungen des resultierenden Übersprechens gelten natürlich nur dann für das gesamte Frequenzband, wenn die Pegeldifferenzen bzw. Phasendifferenzen und Übersprechwerte frequenzunabhängig und außerdem gleichsinnig sind, was praktisch meistens nicht der Fall sein dürfte. Dann gilt die Betrachtung nur für eine bestimmte Frequenz.

4.1. Addition mehrerer Pegeldifferenzen im M|S-Weg

Das resultierende Übersprechen wird durch die Summe aller Pegeldifferenzen im M|S-Weg bestimmt.

Es gilt also analog 3.2. bei Voraussetzung von

$$M' = M$$

$$S' = S(1 - \delta) \quad \delta = \sum \delta_v$$

$$b_u = 20 \log \frac{X'}{Y'} = 20 \log \frac{2 - \sum \delta_v}{\sum \delta_v} \quad (15)$$

Als Maß für den Pegelunterschied wurde bisher der (prozentuale, d. h. lineare) Differenzfaktor δ verwendet.

Will man mit logarithmischen Pegeldifferenzen (die in dB angegeben werden) rechnen, so läßt sich für kleine Pegeldifferenzen $\Delta p \leq 1 \text{ dB}$ folgende Vereinfachung angeben:

$$\Delta p/\text{dB} = 20 \log \frac{A_1}{A_2} \text{ mit } A_2 = A_1(1 - \delta) \quad (16)$$

Damit erhält man analog Gleichung (11)

$$\Delta p/\text{dB} = 20 \log \frac{1}{1 - \delta}, \quad (17)$$

wobei für $\delta \ll 1$ folgende Näherungen gelten:

a) $\frac{1}{1 - \delta} \approx 1 + \delta$ (18)

b) $\ln(1 + \delta) = \delta - \frac{\delta^2}{2} + \frac{\delta^3}{3} - + \dots \approx \delta$ (19)

Damit ergibt sich nach Umrechnung von ln in lg

$$\Delta p/\text{dB} \approx 9 \cdot \delta \quad (20)$$

($0 \leq \delta \leq 0,2$ bei einem Fehler kleiner als 5%).

Die Berechnung der Übersprechdämpfung mittels dieser Näherung ergibt nun aus Gleichung (15)

$$(\Delta p = \text{Pegeldifferenz in dB})$$

$$b_u \approx 20 \log \frac{18 - \Delta p}{\Delta p} \quad (21)$$

Eine Vervielfachung der Pegeldifferenz Δp auf $n\Delta p$ wirkt sich dabei wie folgt auf die Verringerung der Übersprechdämpfung aus:

$$\Delta b_u = b_{u, n\Delta p} - b_{u, \Delta p}$$

$$= 20 \log \frac{18 - \Delta p}{\Delta p} - 20 \log \frac{18 - n\Delta p}{n\Delta p}$$

$$= 20 \log \left(n \frac{18 - \Delta p}{18 - n\Delta p} \right)$$

$$\Delta b_u \approx 20 \lg n \text{ für } n\Delta p < 2 \text{ dB (s. Tab. 2)} \quad (22)$$

Tabelle 2

n	2	3	4	5	10
$\Delta b_u/\text{dB}$	6	9,5	12	14	20

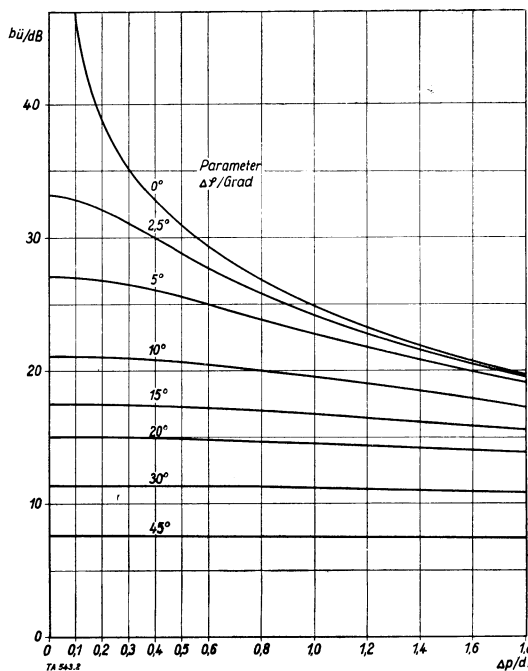


Abb. 2 Resultierende Übersprechdämpfung b_u in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz Δp und der Phasendifferenz $\Delta \varphi$ vor der Umsetzung

Im Bereich kleiner Pegeldifferenzen ($\Delta p < 1$ dB) kann man also mit einer Verschlechterung der Übersprechdämpfung b_u um etwa 6 dB rechnen, wenn man eine bestehende Pegeldifferenz Δp zwischen den Kanälen M und S verdoppelt. Dies bestätigt auch die Kurve (Abb. 2)

Für $n\Delta p > 2$ dB muß die entstehende Verschlechterung der Übersprechdämpfung aus der Kurvenschar Abb. 2 abgelesen werden. Außerdem wird darauf hingewiesen, daß Gleichung (22) nur gilt, wenn keine Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen M und S vorhanden ist.

4.2. Resultierendes Übersprechen bei Durchlaufen mehrerer Vierpole im X/Y-Weg, die ein Übersprechen herbeiführen

Das resultierende Übersprechen der Kette wird von dem Glied mit der schlechtesten Übersprechdämpfung bestimmt. Bei Hintereinanderschaltung mehrerer Glieder gleicher Übersprechdämpfung ergibt sich insgesamt ebenfalls eine Verschlechterung, da sich die im vom Übersprechen beeinflussten Kanal entstehenden Spannungsanteile linear addieren (gleiche Frequenz und — im ungünstigsten Fall, der ja angenommen werden muß — gleiche Phase vorausgesetzt).

Für einen angenommenen Fall

$$\begin{aligned} X &= X \\ Y &= 0 \end{aligned}$$

ergibt sich für n durchlaufene Glieder mit dem Übersprechfaktor k

$$X' = X \text{ (Rück-Übersprechen vernachlässigt)}$$

und

$$Y' = n \cdot k \cdot X \tag{23}$$

Damit folgt für die resultierende Übersprechdämpfung

$$\begin{aligned} b_u &= 20 \lg \frac{X'}{Y'} = 20 \lg \frac{X}{n \cdot k \cdot X} \\ &= 20 \lg \frac{1}{n \cdot k} \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} b_u &= b_{u_0} - \Delta b_u \\ &= -20 \lg k - 20 \lg n \end{aligned} \tag{25}$$

Die Verschlechterung der Übersprechdämpfung

$$\Delta b_u = 20 \lg n \tag{26}$$

nimmt für n Glieder formal die gleichen Werte an, wie die aus Gleichung (22) entstandene Tabelle 2 angibt (s. a. die Kurve in Abb. 3).

Praktisch heißt das z. B., wenn ein Band auf einer Magnettonanlage mit einer Übersprechdämpfung von 35 dB aufgenommen

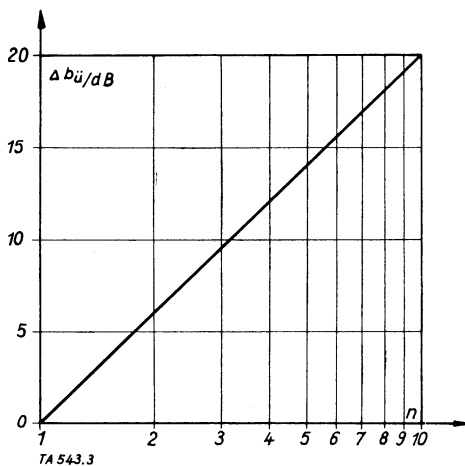


Abb. 3 Verschlechterung der Übersprechdämpfung Δb_u bei n Gliedern gleichen Übersprechens

und zweimal umgeschnitten wird, sie also dreimal durchläuft, so beträgt die resultierende Übersprechdämpfung nur noch $35 \text{ dB} - 9,5 \text{ dB} = 25,5 \text{ dB}$.

5. Frequenzgangänderung des Summensignals M in Abhängigkeit von der Phasendifferenz zwischen den beiden Einzelkomponenten X und Y

$$X = a \cdot \sin \omega t \tag{27}$$

$$Y = a \cdot \sin (\omega t + \Delta\varphi)$$

Die Addition beider Spannungen ergibt das kompatible Signal

$$M = \frac{X + Y}{\sqrt{2}}$$

$$|M| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a^2 + a^2 - 2a \cos(180^\circ - \Delta\varphi)} \quad (\text{Cosinussatz}) \tag{28}$$

$$|M| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a^2 + a^2 + 2a^2 \cos \Delta\varphi}$$

bzw.

$$|M_0| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a^2 + a^2 + 2a^2 \cdot 1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2a$$

bei nicht vorhandener Phasenverschiebung ($\Delta\varphi = 0$)

Damit erhält man für die relative Änderung von M als Funktion von $\Delta\varphi$

$$\frac{|M|}{|M_0|} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \cos \Delta\varphi} \tag{29}$$

Der Abfall des Summensignals M gegenüber dem idealen Summensignal M_0 steigt mit wachsender Phasenverschiebung $\Delta\varphi$, wie Abb. 4 zeigt:

($-\frac{|M|}{|M_0|}$ wird mit ΔM bezeichnet)

Diese Abhängigkeit gilt für alle Frequenzen.

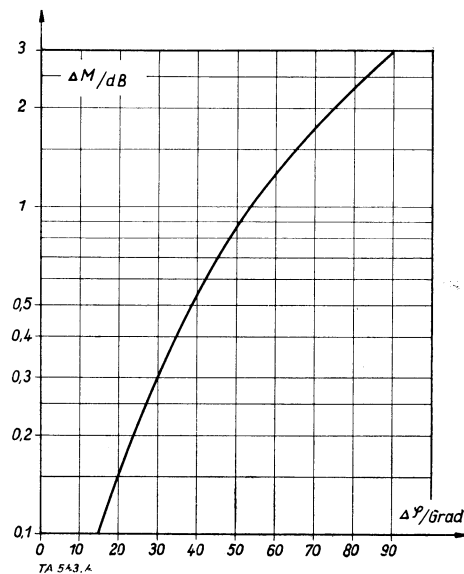


Abb. 4 Pegelverlust des Summensignals ΔM in Abhängigkeit von der Phasendifferenz $\Delta\varphi$

Für eine zugelassene Frequenzgangänderung des kompatiblen Signals von beispielsweise $-0,7$ dB darf also eine Phasendifferenz zwischen X und Y von 45° nicht überschritten werden.

6. Überblick über die Auswirkungen von Phasen- und Pegeldifferenzen sowie Übersprechen in Stereokanälen

Die im vorangegangenen Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse sollen hier noch einmal systematisch gegenübergestellt werden. Durch Vergleich mit den subjektiven Parametern werden die

Auswirkungen auf das wiedergegebene stereofone Klangbild erläutert.

6.1. X/Y-Weg

Pegeldifferenzen zwischen X und Y bewirken eine Verschiebung des Mitteneindrucks und damit eine Balanceverschiebung des gesamten Klangbildes. Die Abhängigkeit des Lokalisierungswinkels (Auswanderung des Mitteneindrucks) von der Pegeldifferenz der beiden Stereokanäle wurde schon von verschiedenen Autoren untersucht. Abb. 5 zeigt die von *Wendt* [8] gemessenen Kurven, außerdem ist noch die klassische Kurve nach *de Boer* [7] eingezeichnet (mit Sprache ermittelt). Setzt man als Wahrnehmbarkeitsschwelle eine Winkelverschiebung von etwa 3...4° an, so ergibt sich aus Abb. 5 als wahrnehmbare Pegeldifferenz zwischen den beiden Kanälen X und Y am Lautsprecher ein Wert von etwa 1 dB. Hierbei ist zu beachten, daß dies die Summe aller Pegeldifferenzen im Übertragungsweg ist.

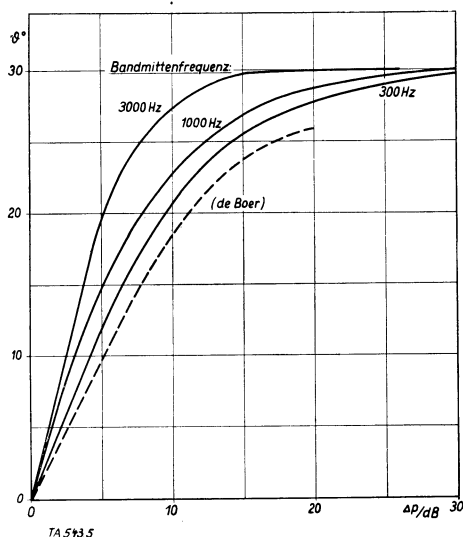


Abb. 5 Abhängigkeit des Lokalisierungswinkels θ von der Pegeldifferenz Δp nach [7] und [8]

Die praktischen Erfahrungen bei Versuchsaufnahmen bestätigen, daß Pegelverschiebungen von 1...1,5 dB durchaus feststellbare Balanceänderungen ergeben.

Phasendifferenzen sind im X/Y-Weg relativ unkritisch, sie stören dagegen bei der Gewinnung des kompatiblen Signals (s. u.). Die kürzlich von *Schiesser* und *Jakubowski* in [9] angegebene Wahrnehmbarkeitsschwelle für Phasendifferenzen zwischen zwei Stereokanälen (Abb. 6) zeigt, daß unterhalb 45° im gesamten Frequenzgebiet überhaupt keine Beeinträchtigung der Wiedergabe eintritt, während für Frequenzen unterhalb 100 Hz und oberhalb 1600 Hz Phasenunterschiede bis 90° zugelassen werden. Außerhalb des Frequenzbereiches zwischen 50 Hz und 3200 Hz hört die Empfindung für Phasendifferenzen überhaupt auf.

Allgemein ergibt sich bei Phasenunterschieden eine Verwaschung des Richtungseindrucks sowie ein Präsenzverlust.

Ein Übersprechen zwischen X und Y führt zur Verringerung der Basisbreite und damit zu einer Lokalisationsverschlechterung. Im Extremfall ($b_u = 0$) bedeutet das den vollständigen Verlust des Stereoeindrucks. Für eine einwandfreie Stereowiedergabe ist eine resultierende Übersprechdämpfung zwischen beiden Signalen von 20...24 dB erforderlich. Um diesen Wert einhalten zu können, sollte der Übertragungsweg selbst eine Übersprechdämpfung von mindestens 26 dB besitzen (Messung über die ganze Kette).

6.2. M/S-Weg

Pegel- sowie Phasendifferenzen im M/S-Weg rufen eine Erhöhung des Übersprechens im resultierenden X/Y (L/R)-Signal hervor, was subjektiv zu einer Basisveränderung führt (Ver-

größerung von M \rightarrow Basisverengung, Vergrößerung von S \rightarrow Basiserweiterung).

Eine Verpolung ($\Delta\varphi = 180^\circ$) führt zu einer Seitenvertauschung zwischen X und Y, wie sich leicht nachweisen läßt.

Pegel- und Phasendifferenzen im M/S-Weg wirken sich (soweit nicht bestimmte Effekte beabsichtigt sind, Richtungsmischung) wesentlich unangenehmer aus als im X/Y-Weg. Während eine Pegeldifferenz von 1 dB zwischen X und Y noch vertretbar ist,

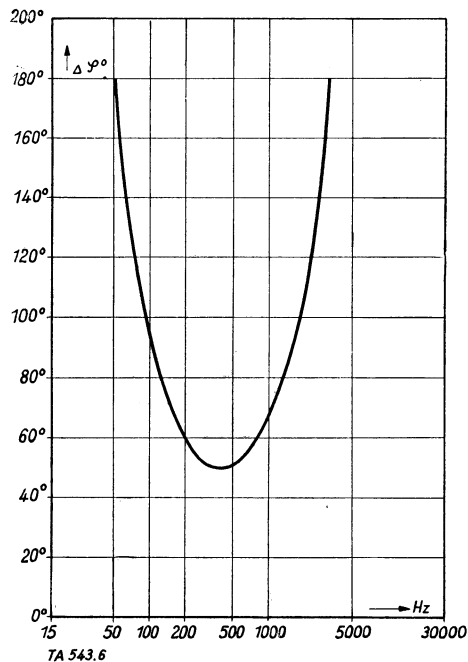


Abb. 6 Wahrnehmbarkeitsschwelle für Phasendifferenzen nach [9]

bewirkt eine gleich große Differenz im M/S-Kanal eine Übersprechdämpfung von nur noch 25 dB im X/Y-Weg, die bei Auftreten von zusätzlichen Phasendifferenzen noch verringert wird.

Übersprechen im M/S-Weg führt zu Pegelverschiebungen im X/Y-Signal. Da sich die Übersprechdämpfung zwischen M und S im allgemeinen ohne Schwierigkeiten groß genug halten läßt, ist dieser Effekt von untergeordneter Bedeutung.

6.3. Übersicht

Die folgende Tabelle soll die Übersicht über die gegenseitige Beeinflussung der Stereosignale X/Y und M/S bei Signalveränderungen vor einer Umsetzung erleichtern. Die Beziehungen gelten in beiden Richtungen, d. h. sowohl für eine Umsetzung von X/Y in M/S wie umgekehrt.

Als Beispiel: Eine Signalvertauschung im M/S- (X/Y-) Weg ergibt nach der Umsetzung einen Polungsfehler im X/Y- (M/S-) Weg.

Beeinflussung vor der Umsetzung	Verpolung ($\Delta\varphi = 180^\circ$)	Signalvertauschung	Pegel- bzw. Phasendifferenz	Übersprechen
ergibt im umgesetzten Signalpaar	Signalvertauschung	Verpolung	Übersprechen	Pegeldifferenz

6.4. Kompatibles Signal

Das durch Addition der beiden Stereosignale entstehende kompatible Signal wird vor allem von Phasendifferenzen zwischen X und Y beeinflusst, welche Frequenzgangänderungen (infolge teilweiser Auslöschung) hervorrufen.

Läßt man eine maximale Pegelabsenkung von 1,5 dB zu, so ergibt sich nach Abschnitt 5 ein zulässiger Phasenwinkel von 65°, der jedoch bei mittleren Frequenzen infolge der Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Stereoübertragung auf 45° begrenzt werden muß.

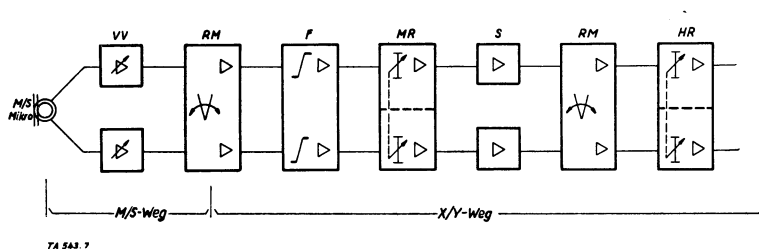


Abb. 7 Prinzipdarstellung der Regiekette in einer moderneren Anlagentechnik

- VV Vorverstärker
- RM Richtungsmischer
- F Filter, Begrenzer o. ä.
- MR Mikrofon-Reglerverstärker
- S Sammelschienenverstärker
- HR Haupt-Reglerverstärker

6.5. Anlagentechnische Folgerungen

Die aus den Rechnungen bzw. den Vergleichen unter 6.1. und 6.2. zwangsläufig entstehende Schlußfolgerung, M/S-Übertragungswege zu vermeiden, läßt sich nicht immer verwirklichen, da an bestimmten Stellen (verfahrensbedingt) mit M/S-Signalen gearbeitet werden muß, wie eingangs schon erläutert. Diese Teile der Übertragungskette müssen jedoch die Möglichkeit für einen besonders genauen Abgleich besitzen. Als Ergänzung zu Abb. 1 soll hier noch die Prinzipdarstellung einer möglichen Gestaltung einer Stereo-Regiekette in einer modernen Anlagen-Technik abgegeben werden, in der die mit M/S-Signalen arbeitenden Teile der Kette auf ein Minimum verringert werden (Abb. 7).

Ein Abgleich des M/S-Weges ist mit Hilfe der stufenlos einstellbaren Vorverstärker möglich. Die Umschaltmöglichkeit der Richtungsmischer gestattet jedoch auch jede andere Mischtechnik, z. B. analog den in Abb. 1 angedeuteten.

6.6. Forderungen an NF-Parameter

An dieser Stelle sollen kurz die in diesem Zusammenhang interessierenden Werte der NF-Parameter angegeben werden, wie sie der OIRT vorgeschlagen wurden. Die Werte beziehen sich auf das Ende der Übertragungskette (resultierendes L/R-Signal am Lautsprecher) und stützen sich auf die neuesten Erkenntnisse.

Übersprechdämpfung	$b_a < 26 \text{ dB}$
Pegeldifferenz	$\Delta p < 1,5 \text{ dB}$
Phasendifferenz	$\Delta \varphi < 45^\circ$ zwischen 200...3750 Hz, $\Delta \varphi < 65^\circ$ bei 50 Hz und 15000 Hz.

Daß zur Erreichung dieser Werte die Toleranzen der Regiekette wesentlich enger liegen müssen, da sich die Signalabweichungen in den einzelnen Gliedern des Übertragungsweges addieren können, braucht nicht näher erläutert zu werden.

7. Schlußbemerkungen

Der vorliegende Beitrag beabsichtigte keinesfalls eine umfassende Darstellung der Problematik, es wurde vielmehr versucht, an Hand einfacher Berechnungen und Beispiele einen Einblick in die Zusammenhänge zwischen Pegel, Phase und Übersprechen zweier Stereokanäle unter dem besonderen Gesichtspunkt der Umsetzung zu geben.

Die Betrachtungen gelten nur für das reine NF-Signal, also für die Kette zwischen Mikrofon und Eingang des Modulators im Stereo-Coder. Für das codierte Komplexsignal gelten andere Bedingungen, die in Abhängigkeit vom verwendeten HF-Verfahren unterschiedlich sein können.

Eingegangen am 27. 8. 1963

TA 543

Literatur

- [1] L. Keibs; Perspektiven für eine raumbezogene Rundfunkübertragung. Techn. Mitteilungen des BRF 4 (1960) H. 1
- [2] Kaszynski und Ortmeier; Die Zweikanalstereofonie und ihre Aufnahmeverfahren. Bild und Ton 14 (1961) H. 4 u. 5
- [3] K. Bertram; Aufnahmetechnik für kompatible Stereofonie. radio mentor 24 (1958) H. 9
- [4] G. Steinke; Vorbereitungen für die Stereo-Übertragungstechnik beim Rundfunk. Techn. Mitteilungen des BRF 5 (1961) H. 2
- [5] G. Steinke, W. Hoeg und M. Wasner; Einrichtung eines Experimental-Regieraumes für Mehrkanal-Aufnahmetechnik. Techn. Mitteilungen des RFZ 7 (1963) H. 3
- [6] S. Funk; Übersicht über die verschiedenen hochfrequenten Stereoübertragungsverfahren. Techn. Mitteilungen des BRF 5 (1961), H. 4
- [7] K. de Boer; Plastische Klangwiedergabe. Philips Techn. Rundschau 5 (1940) H. 4
- [8] K. Wendt; Versuche zur Ortung von Intensitätsstereofonie Frequenz 14 (1960) H. 1
- [9] H. Schiesser und H. Jakubowski; Der Einfluß von Phasen- und Laufzeitunterschieden bei der Übertragung von Stereosignalen. Rundfunktechn. Mitteilungen 7 (1963) H. 3