

1 Technische Dokumentation lesen

($\Sigma=12P$)

Sie finden im Anhang einige Datenblätter zu drei verschiedenen Operationsverstärkern (OPs). Komplettieren Sie mit Hilfe dieser Datenblätter Tabelle 1. Suchen Sie nach Möglichkeit typische Werte bei 25°C heraus. (Unterschiedliche Betriebsspannungen müssen leider hingenommen werden. ½ Punkt je richtigem Wert.)

(12P)

Tabelle 1: Typische Parameter dreier handelsüblicher OPs bei T=25°C und $R_L \rightarrow \infty$

Parameter	Akronym im Unterricht	TL081M $V_{CC}=\pm 15V$	OP07 $V_S=\pm 15V$	LM7301 $V_S=5V$	Dim.	Kommentare
Supply Voltage, Maximum	$\max\{V_S\},$ $\max\{V_{CC}\}$	36	44	32	V	maximale Betriebsspannung ($V^+ - V^-$)
Supply Voltage, Minimum	$\min\{V_S\},$ $\min\{V_{CC}\}$	7	6	1,8	V	minimale Betriebsspannung ($V^+ - V^-$)
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	86	123	88	dB	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	86	$20\text{dB} \log(1/5E-6)$ 106	104	dB	
Large Signal Diff. Volt. Gain	A_V	200	500	71	V/mV	at $R_L \rightarrow \infty$
		106	114	97	dB	
Input Offset Voltage	U_{off}	9	0,03	0,03	mV	
Input Bias Current	I_B	0,03	$\pm 1,2$	-40 .. 90	nA	DC Eingangsstrom (von ... bis ...)
Slew Rate	SR	13	0,3	1,25	V/ μ s	at $R_L \rightarrow \infty$

Vergleichen Sie die DC-Eingangsströme und die Offset-Spannungen. Bei welchen OPs vermuten Sie FET-Eingänge und bei welchen bipolare Eingänge?

(1P)

JFET-Eingänge: TL08x,

bipolare Eingänge: OP07, LM7301

2 Der Bipolar-Transistor

(Σ=8P)

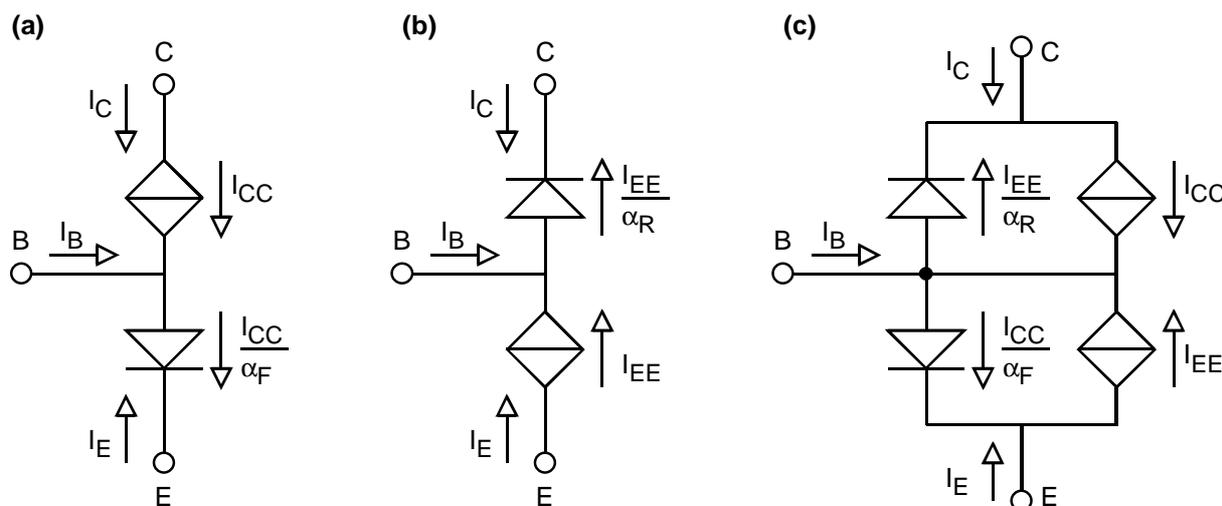


Bild 2: EM1-Modell: (a) Forward, (b) Reverse, (c) gesamt.

Welche Formel beschreibt in Bild 2(a) den Emitterstrom I_E als Funktion von I_{CC} und α_F ? (1P)

$$I_E = -I_{CC} / \alpha_F$$

Welche Formel beschreibt in Bild 2(a) den Basisstrom I_B als Funktion von I_{CC} und β_F ? (1P)

$$I_B = I_{CC} / \beta_F$$

Welche Formel beschreibt in Bild 2(b) den Kollektorstrom I_C als Funktion von I_{EE} und α_R ? (1P)

$$I_C = -I_{EE} / \alpha_R$$

Welche Formel beschreibt in Bild 2(b) den Basisstrom I_B als Funktion von I_{EE} und β_R ? (1P)

$$I_B = I_{EE} / \beta_R$$

Welche Formel beschreibt in Bild 2(c) den Kollektorstrom I_C als Funktion von I_{EE} und I_{CC} ? (1P)

$$I_C = I_{CC} - I_{EE} / \alpha_R$$

Welche Formel beschreibt in Bild 2(c) den Emitterstrom I_E als Funktion von I_{EE} und I_{CC} ? (1P)

$$I_E = I_{EE} - I_{CC} / \alpha_F$$

Zeigen Sie, dass für Bild 2(c) mit $\beta_F = \alpha_F / (1 - \alpha_F)$ und $\beta_R = \alpha_R / (1 - \alpha_R)$ gilt: $I_B = I_{CC} / \beta_F + I_{EE} / \beta_R$. (2P)

$$I_B = -I_C - I_E = -\left(I_{CC} - \frac{I_{EE}}{\alpha_R}\right) - \left(I_{EE} - \frac{I_{CC}}{\alpha_F}\right) = I_{CC} \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F} + I_{EE} \frac{1 - \alpha_R}{\alpha_R} = \frac{I_{CC}}{\beta_F} + \frac{I_{EE}}{\beta_R}, \text{ q. e. d.}$$

3 Differenzieller Verstärker

($\Sigma=22P$)

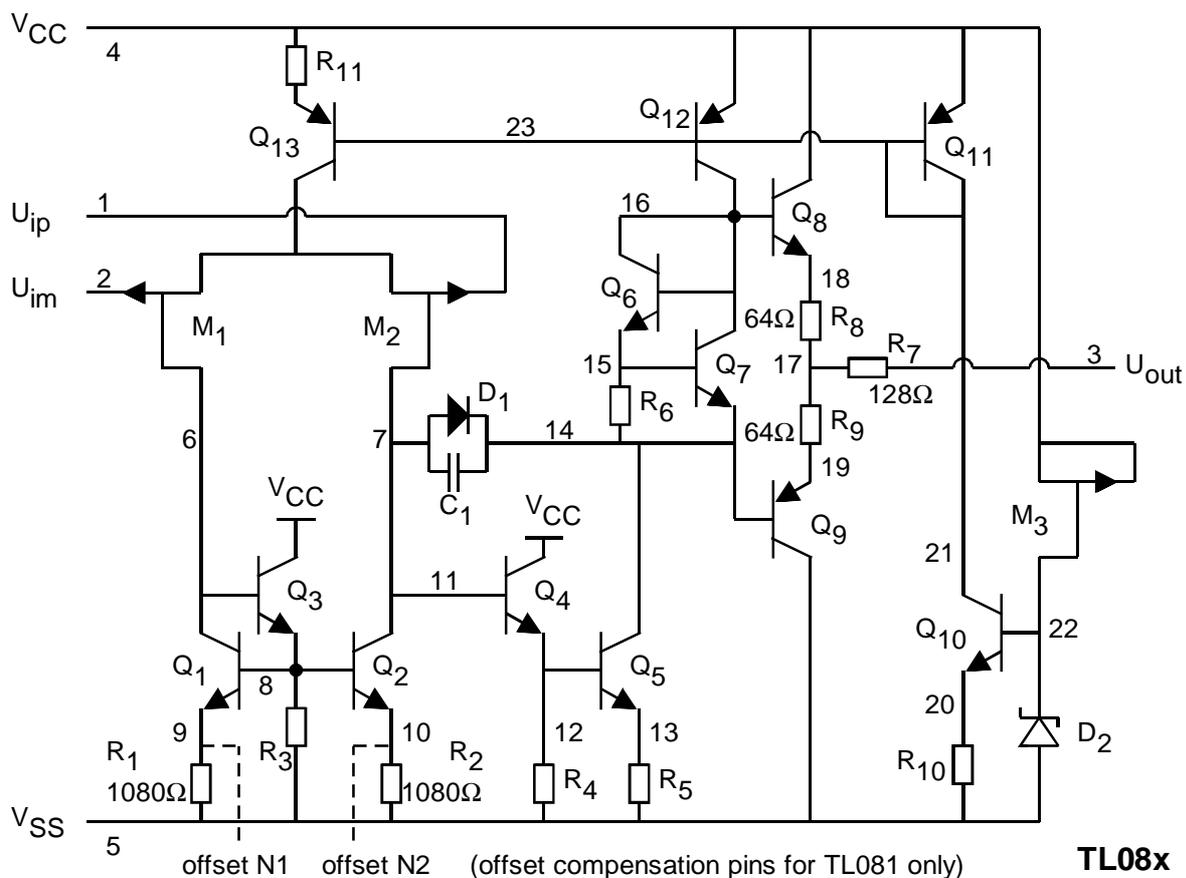


Abbildung 3: Innenschaltung des TL081, TL082, TL084 und ähnliche. C_1 ist die Sperrschichtkapazität der Diode D_1 . Dimensionslose Zahlen benennen Schaltungsknoten.

Welche Bauelemente bilden den "Biasing Circuit"? (2P)

Q_{10} , Q_{11} , Q_{12} , Q_{13} , M_3 , D_2 , R_{10} , R_{11}

Welche Bauelemente bilden die Eingangsstufe? (2P)

M_1 , M_2 , Q_1 , Q_2 , Q_3 , R_1 , R_2 , R_3

Welche Bauelemente bilden den Zwischenverstärker? (2P)

Q_4 , Q_5 , R_4 , R_5 , D_1 , C_1

Welche Bauelemente bilden die Endstufe? (2P)

Q_6 , Q_7 , Q_8 , Q_9 , R_6 , R_7 , R_8 , R_9 ,

Was sind die drei Hauptaufgaben des Zwischenverstärkers? (2P)

1. verstärken, 2. Pegelschieben, 3. Frequenzkompensation

Wozu dient der Transistor Q_3 ? (1P)

Teilt Belastung von I_{C1} durch $I_{B1}+I_{B2}$ durch β_3

Wie nennt man den Schaltungsblock, den die Transistoren Q_1, Q_2 bilden? (1P)

Stromspiegel

Wozu dient der Widerstand R_3 ? (1P)

I_{E3} vergrößern, ist nun fast unabhängig von $I_{B1}+I_{B2}$

Wie nennt man den Schaltungsblock, den die Transistoren Q_{11}, Q_{12}, Q_{13} bilden? (1P)

Stromspiegel

Wie nennt man den Schaltungsblock, den die Bauelemente R_{10}, Q_{10}, D_2 bilden? (1P)

Stromquelle

Wie groß (Formel) ist der Kollektorstrom I_{C11} durch den Transistor Q_{10} ? (1P)

$(U(D_2) - U_{BE10}) / R_{10}$

Welchen Zweck erfüllt der Widerstand R_{11} ? (1P)

I_{C13} (betragsmäßig) verringern gegenüber I_{C11} und I_{C12}

Wozu dient der Block mit den Transistoren Q_6, Q_7 ? (1P)

Vorspannungserzeugung für Endstufentransistoren Q_8, Q_9

Welchen Zweck erfüllen die Transistoren Q_8, Q_9 ? (1P)

Endstufentransistoren, reine Stromverstärkung

Wozu dienen die Widerstände R_8, R_9 ? (1P)

Ruhestrombegrenzung

In welchem Schaltungsknoten wird durch Einspeisung eines Stromes auf eine hohe Impedanz eine hohe Spannungsamplitude und somit die hohe Verstärkung des OPs erzeugt? (1P)

Knoten 14 (und/oder 16, da mit Spannungsquelle verbunden)

Die Impedanz dieses Knotens ist $Z_k \leq r_{CEx} \parallel r_{CEy}$. Um welche Indizes x und y handelt es sich? (1P)

5 und 12

4 Arbeiten mit Operationsverstärkern (Σ=10P)

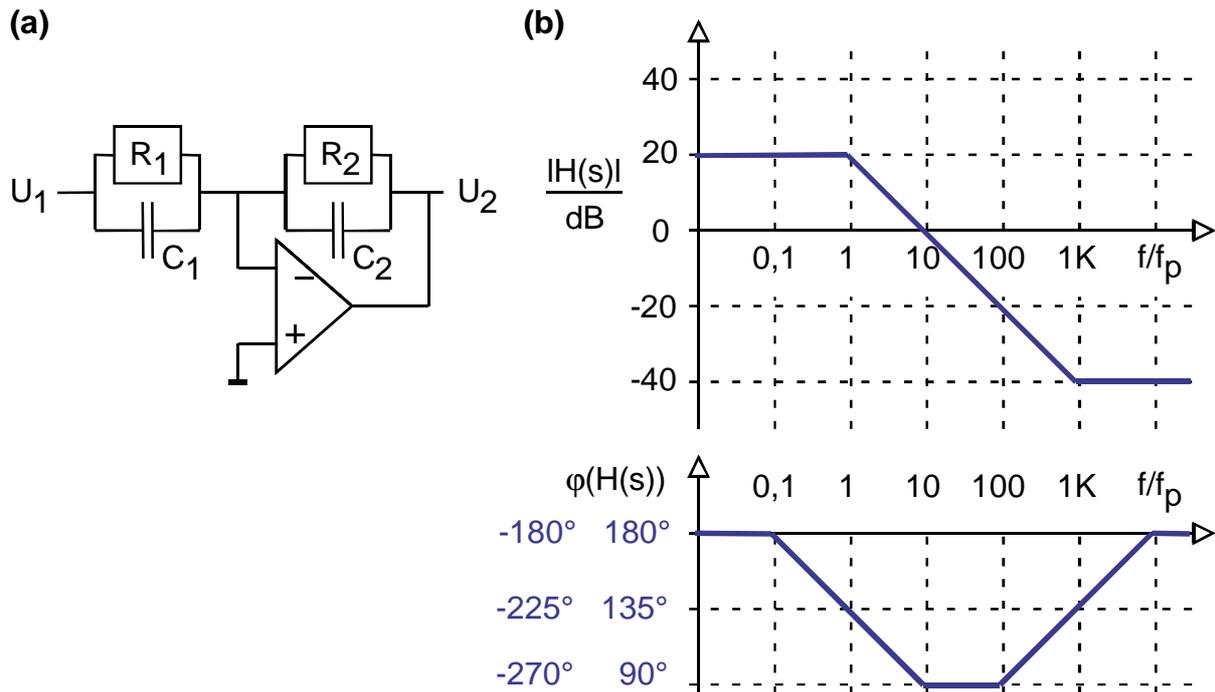


Bild 4: (a) Beschalteter, idealer Operationsverstärker, (b) Bode-Diagramm.

Berechnen Sie die Übertragungsfunktion $H(s)$ der in Abb. 4(a) dargestellten Schaltung als Funktion von R_1, C_1, R_2, C_2 .

(3P)

$$Z_k(s) = \frac{1}{sC_k} \parallel R_k = \frac{R_k}{1 + sR_k C_k} \quad \text{für } k = 1, 2, \quad H(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + sR_1 C_1}{1 + sR_2 C_2}$$

Für $f \rightarrow \infty$ strebt die Eingangsimpedanz Z_{in} gegen $-j / (2\pi f) \rightarrow 0$ (1P)

Berechnen Sie Pol (f_p) und Nullstelle (f_z) der Schaltung als Funktionen von R_1, C_1, R_2, C_2 . (1P)

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}, \quad f_z = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Es ist $R_2 = 10R_1, C_2 = 100C_1$. Wogegen (Formel und Wert) strebt $H(jf)$ für $f \rightarrow 0$ und $f \rightarrow \infty$? (2P)

$$H(jf \rightarrow 0) \rightarrow -R_2/R_1 = 10 \quad \text{und} \quad H(jf \rightarrow j\infty) \rightarrow -C_1/C_2 = -0,01$$

Zeichnen Sie den Amplitudengang von $H(jf)$ in Abb. 4(b) ein. (1P)

Beschriften Sie die Ordinate für $\varphi\{H(jf)\}$ in Abb. 4(b) passend. (1P)

Zeichnen Sie den Phasengang von $H(jf)$ in Abb. 4(b) ein. (1P)

Welche Formel beschreibt die Übertragungsfunktion A^* der geschlossenen Schleife, wenn k und A gegeben sind, und wogegen strebt A^* für $|kA| \gg 1$? (2P)

$$A^* = \frac{A}{1+kA} \xrightarrow{|kA| \gg 1} \frac{1}{k}$$

In welcher Frequenz muß die Nullstelle $f_{z,LL}$ des Lead-Lag-Gliedes liegen, um eine optimale Frequenzkompensation für A^* zu erreichen? (Formel mit Parametern aus Bild 5(b) und Wert.) (2P)

$f_{z,LL}$ soll f_{p1} kompensieren, so dass $f_{z,LL} = f_{p1} = 1\text{KHz}$ optimal ist

In welcher Frequenz muß das LL-Glied welche Dämpfung erbringen, um eine Phasenreserve Φ_R von ca. 45° herzustellen? (Formel mit Parametern aus Bild 5(b) und Wert.) (4P)

In $f_{p2}=100\text{KHz}$ wird eine Dämpfung von $1/|kA(f_{p2})| = 1/(80-40)\text{dB} = 1/100$ benötigt

Zeichnen Sie in Bild 5(c) asymptotisch den Amplitudengang $|H_{LL}(jf)|$ des optim. LL-Gliedes. (1P)

Zeichnen Sie in Bild 5(d) asymptotisch den Frequenzgang $|H_{LL}(jf)|$ des optimalen LL-Gliedes. (1P)

Wo liegt die neue, erste Polstelle f'_{p1} der optimal frequenzkompensierten offenen Schleifenverstärkung kA ? (Formel mit Parametern aus Bild 5(b) und Wert.) (2P)

$$f'_{p1} = f_{p,LL} = f_{p,LL} / |kA(f_{p2})| = 1\text{KHz} / 100 = 10\text{Hz}$$

Leiten Sie die Übertragungsfunktion $H_{LL}(s)$ formelmäßig her. (2P)

$$H_{LL}(s) = \frac{Z_{k2}}{R_{k1} + Z_{k2}} = \frac{R_{k2} + 1/sC_{k2}}{R_{k1} + R_{k2} + 1/sC_{k2}} = \frac{1 + sR_{k2}C_{k2}}{1 + s(R_{k1} + R_{k2})C_{k2}}$$

Was sind die Formeln für die Polstelle $f_{p,LL}$ und die Nullstelle $f_{z,LL}$ von $H_{LL}(s)$? (2P)

$$f_{p,LL} = \frac{1}{2\pi(R_{k1} + R_{k2})C_{k2}} \leq f_{z,LL} = \frac{1}{2\pi R_{k2}C_{k2}}$$

Berechnen Sie R_{k2} und C_{k2} bei gegebenem R_{k1} für das optimale LL-Glied. (Formeln mit Parametern aus Bild 5(b) und Werte.) (4P)

$$\frac{R_{k2}}{R_{k1} + R_{k2}} = \frac{1}{kA_V(f_{p2})} = 0,01 \Rightarrow R_{k2} = 100\text{K}\Omega \frac{0,01}{1-0,01} = 100\text{K}\Omega \cdot 0,010101... \cong 1,01\text{K}\Omega$$

$$f_{z,LL} = \frac{1}{2\pi R_{k2}C_{k2}}, \quad f_{z,LL} = f_{p1} = 1\text{KHz} \Rightarrow C_{k2} = \frac{1}{2\pi R_{k2}f_{z,LL}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,01\text{K}\Omega \cdot 1\text{KHz}} = 158\text{nF}$$

6 Rauschen

(Σ=20P)

6.1 Mittel- und Effektivwerte eines Signals

(Σ=6P)

Mittelwert einer Spannung $u(t)$	Mittelwert des Quadrates $u^2(t)$ einer Spannung $u(t)$	Effektivwert von $u(t)$ und für die Summe unkorrelierter $u_i(t)$
$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot dt$	$\overline{u^2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) \cdot dt$	$u_{eff} = \sqrt{\overline{u^2}}, \quad u_{eff,ges} = \sqrt{\sum_i u_{eff,i}^2}$

Berechnen Sie den Mittelwert von $u(t) = \hat{u} \cos(2\pi t/T)$ über eine Periode $t=0 \dots T$. (2P)

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \cdot \cos(2\pi t/T) \cdot dt = \hat{u} (\sin(2\pi) - \sin(0)) = -\hat{u}(0 - 0) = 0$$

Berechnen Sie den Mittelwert von $u^2(t)$ in der Periode $t=0 \dots T$. Hinweis: $\cos^2 x = \frac{1}{2}(1 + \cos 2x)$ (3P)

$$\overline{u^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\hat{u}^2}{2} (1 - \cos(4\pi t/T)) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\hat{u}^2}{2} dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\hat{u}^2}{2} \cos(4\pi t/T) dt = \frac{\hat{u}^2}{2} + 0 = \frac{\hat{u}^2}{2}$$

Berechnen Sie aus obigem Ergebnis den Effektivwert u_{eff} von $u(t) = \hat{u} \cos(\omega t)$. (1P)

$$u_{eff} = \sqrt{\overline{u^2}} = \sqrt{\frac{\hat{u}^2}{2}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$

6.2 Summation korrelierter und unkorrelierter Signale (Σ=14P)

Bild 6.2:
Summation von M korrelierten Nutzsignalen und M unkorrelierten Rauschsignalen.

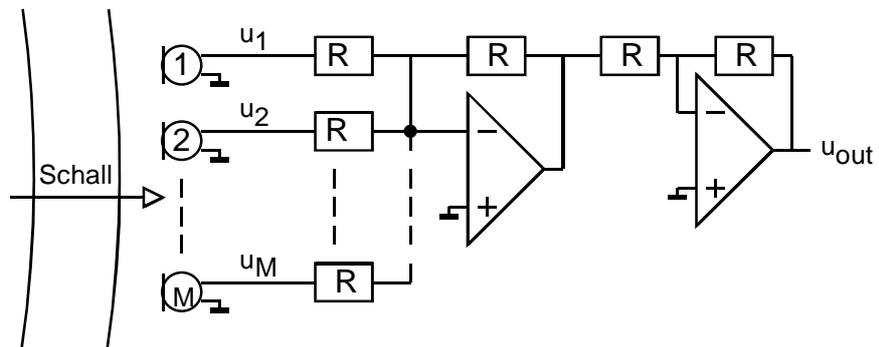


Bild 6.2 zeigt ein Array von M Mikrofonen, deren Ausgangssignale u_i in der gezeigten Schaltung summiert werden. Berechnen Sie das Ausgangssignal $u_{out}(t)$ der Verstärkerschaltung als Funktion ihrer Eingangssignale $u_i(t)$, $i=1 \dots M$. (2P)

$$u_{out} = u_1 + u_2 + \dots + u_M = \sum_{i=1}^M u_i$$

Die Mikrofonsignale u_i bestehen aus den korrelierten Nutzsignalanteilen $u_{k,i}$ und dem Rauschanteil $u_{n,i}$, die getrennt verrechnet werden dürfen: $u_i = u_{k,i} + u_{n,i}$. (1P)

Es gilt: Korrelierte Signalanteile summieren sich in der *...Amplitude...*

Welches Ausgangssignal $u_{k,out}(t)$ liefern die korrelierten Signalanteile $u_{k,i}(t)$, wenn alle Mikrofone das gleiche Nutzsignal $u_k(t) = u_{k,i}(t)$ liefern ($i=1 \dots M$)? (2P)

$$u_{k,out}(t) = \sum_{i=1}^M u_{k,i}(t) = \sum_{i=1}^M u_k(t) = u_k(t) \cdot M$$

Welches Ausgangssignal $u_{k,out}(t)$ liefern die korrelierten Signalanteile $u_{k,i}(t)$, wenn bei geradem M benachbarte Mikrofone inverse Nutzsignale liefern, also $u_{k,i+1} = -u_{k,i}$? (2P)

$$u_{k,out} = u_{k,1} + u_{k,2} + u_{k,3} + u_{k,4} + \dots + u_{k,M-1} + u_{k,M} = u_{k,2} - u_{k,2} + u_{k,4} - u_{k,4} + \dots + u_{k,M} - u_{k,M} = 0$$

Es gilt: Unkorrelierte Signale summieren sich in der *...Leistung...* (1P)

Welche effektive Rauschspannung $u_{neff,out}$ liefern die unkorrelierten Signalanteile am Ausgang der Schaltung, wenn alle Mikrofone die gleiche effektive Rauschspannung $u_{neff,i} = u_{neff}$ liefern? (2P)

$$\overline{u_{neff,out}} = \sqrt{\sum_{i=1}^M u_{neff,i}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^M u_{neff}^2} = \sqrt{u_{neff}^2 \cdot M} = u_{neff} \cdot \sqrt{M}$$

Kreuzen Sie die richtigen Antworten an: (1P Abzug je falschem Ankreuzen)

M korrelierte Signale ... (2P)

- addieren sich in der Amplitude.
- addieren sich in der Leistung.
- können sich gegenseitig bis zur Auslöschung abschwächen.
- gleicher Signalleistung P_1 können sich zu einer Gesamtleistung $P_N = M \cdot P_1$ summieren.
- gleicher Signalleistung P_1 können sich zu einer Gesamtleistung $P_N = M^2 \cdot P_1$ summieren.

M unkorrelierte Signale ... (2P)

- addieren sich in der Amplitude.
- addieren sich in der Leistung.
- können sich gegenseitig bis zur Auslöschung abschwächen.
- gleicher Signalleistung P_1 können sich bis zu einer Gesamtleistung $P_{ges} = M \cdot P_1$ summieren.
- gleicher Signalleistung P_1 können sich bis zu einer Gesamtleistung $P_{ges} = M^2 \cdot P_1$ summieren.