

FACHHOCHSCHULE MANNHEIM

Hochschule für Technik und Gestaltung

Institut für Regelungstechnik

Versuch Nr.:

3.2

Labortermin:

Abgabetermin:

Versuchstitel:

Frequenzgangmessungen

Namen:

Eingang:

Testat:

FACHHOCHSCHULE MANNHEIM
Hochschule für Technik und Gestaltung
Institut für Regelungstechnik

Semester:

Gruppe:

13. JAN 2004

Korrekturhinweise:

Frequenzgangmessungen an Regelkreisgliedern

1. Versuchsgrundlagen

Der Versuch wird am "Simulationsgerät" (siehe Beschreibung BR 9) durchgeführt.

Frequenzgang und Ortskurve

Das Übertragungsverhalten (ÜV) von Regelkreisgliedern kann exakt erfaßt werden durch die Zuordnung des Verlaufs der Ausgangsgröße $x_a(t)$ zu zeitlich sinusförmigen Änderungen der Eingangsgröße $x_e(t)$.

Der *Frequenzgang* $F(j\omega)$ ist das Verhältnis des Zeigers des sinusförmigen Ausgangssignals eines stetig wirkenden linearen Übertragungsgliedes zum Zeiger des angelegten sinusförmigen Eingangssignals im eingeschwungenen Zustand, dargestellt als Funktion der Kreisfrequenz ω oder der Frequenz f (DIN 19226).

Als *Ortskurve* des Frequenzganges bezeichnet man die graphische Darstellung der Funktion $F(j\omega)$ in der komplexen Zahlenebene mit ω oder f als Parameter.

Der *Frequenzgang* kann mathematisch oder experimentell ermittelt werden. Für die experimentelle Ermittlung der Ortskurve des Frequenzganges wird ein Frequenzgenerator benötigt, der die sinusförmigen Eingangssignale in der erforderlichen physikalischen Form liefert. Im eingeschwungenen Zustand werden für jede eingestellte Frequenz die sinusförmigen Ein- und Ausgangsgrößen registriert. Daraus lassen sich die jeweiligen Amplitudenverhältnisse und Phasenverschiebungen ermitteln.

2. Aufgabenstellung

2.1 Frequenzgangmessungen an "passiven Netzwerken"

Von den mit dem Baustein "*Passive Bauelemente*" (BR 9, Kap. 2.2) aufzubauenden Schaltungen Nr. 1 und 2 auf Seite 2 ist jeweils der Frequenzgang aufzunehmen.

Durchführung der Messungen

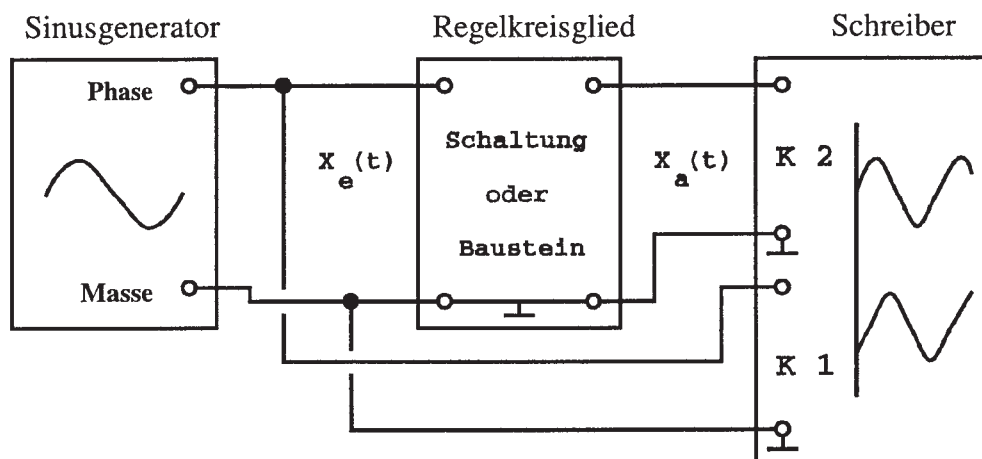
- Schreibereinstellungen (sh. Beschreibung BR 10) :
 - Meßbereich : 5 V "kalibriert"
 - Nullpunkteinstellung bei 50 %
 - Papiervorschub : f - abhängig
 - ZVK einschalten !

- Jeweilige Schaltung gemäß den unten stehenden Angaben aufbauen und (wie im Versuchsaufbau angegeben) mit Sinusgenerator und Schreiber verbinden.
 - Am Sinusgenerator eine Amplitude von 4 V (pk - pk) einstellen.
 - Erste geforderte Frequenz ($f = 0,01$ Hz) einstellen.
 - Sinusgenerator einschalten und Einschwingvorgänge (2 - 3 Schwingungen) abwarten.
 - Bei eingeschaltetem Vorschub 2 - 3 Schwingungen aufzeichnen.
 - Nächste Frequenz einstellen und weitere Messung vornehmen..... usw.
- Hinweis : Vorschubgeschwindigkeit des Schreibers der Frequenz entsprechend ändern. \Rightarrow siehe Tabelle

Einzustellende Frequenzen in Hz und empfohlene Vorschubgeschwindigkeiten :

Frequenz	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,2	0,5	Hz
Vorschub	3	6	12	12	30	60	120	cm/min

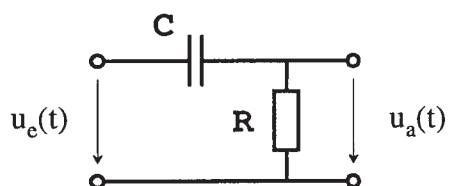
VERSUCHSAUFBAU



SCHALTUNGEN

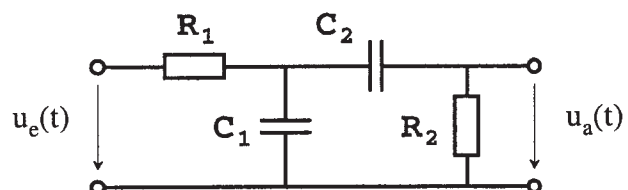
Schaltung 1

$R = 150 \text{ k}\Omega$ $C = 40 \text{ }\mu\text{F}$



Schaltung 2 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ $C_1 = 30 \text{ }\mu\text{F}$

$R_2 = 150 \text{ k}\Omega$ $C_2 = 40 \text{ }\mu\text{F}$



2.2 Frequenzgangmessungen an "aktiven Übertragungsgliedern"

Von den im Baustein "Aktive Übertragungsglieder" (BR 9 , Kap. 2.3) enthaltenen Bausteinen Nr. 1 und 2 ist jeweils der Frequenzgang aufzunehmen.

- Schreibereinstellungen und Versuchsaufbau wie unter Punkt 2.1
- Am Sinusgenerator eine Amplitude von ca. 1,5 V (pk - pk) einstellen.
- Weiterer Versuchsablauf wie unter Punkt 2.1

Einzustellende Frequenzen in Hz und empfohlene Vorschubgeschwindigkeiten :

Baustein 1	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,2	0,5	f /Hz
Vorschub	3	6	12	12	30	60	120	cm/min

Baustein 2	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,15	f /Hz
Vorschub	3	6	12	12	12	30	60	cm/min

3. Auswertung

Aus den unter 2.1 und 2.2 aufgenommenen Aufzeichnungen sind jeweils zu ermitteln und in die entsprechende Tabelle 1 auf den Seiten 4 bis 7 einzutragen :

- die Amplitudenverhältnisse \hat{u}_a / \hat{u}_e ($|F(j\omega)|$), sowie $F_{dB} = 20 \lg |F(j\omega)|$
- die Phasenverschiebungen φ_{10}

Mit diesen ermittelten Werten sind jeweils auf den Seiten 4 bis 7 darzustellen :

- 3.1 • die Ortskurve des Frequenzganges
- 3.2 • der Amplitudengang F_{dB}
- der Phasengang $\varphi(\omega)$

$17 \text{ dB} = 20 \cdot \log |F(\omega)|$
in Dezibel umgerechnet
Fragen Sie den Phasengang in
das gleiche
Diagramm
ein

Für die unter 2.1 untersuchten Schaltungen 1 und 2 ist jeweils zu bestimmen :

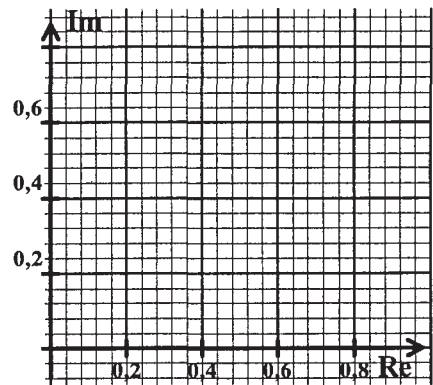
- 3.3 • die Funktion des Frequenzganges $F(j\omega)$ (Herleitung !)
- die theoretische Ortskurve (Werte in Tabelle 1 und Kurve farbig in 3.1 eintragen)
- die vereinfachten Frequenzkennlinien (Asymptoten und Grundwerte - farbig in 3.2)

Gravierende Abweichungen sind zu diskutieren !

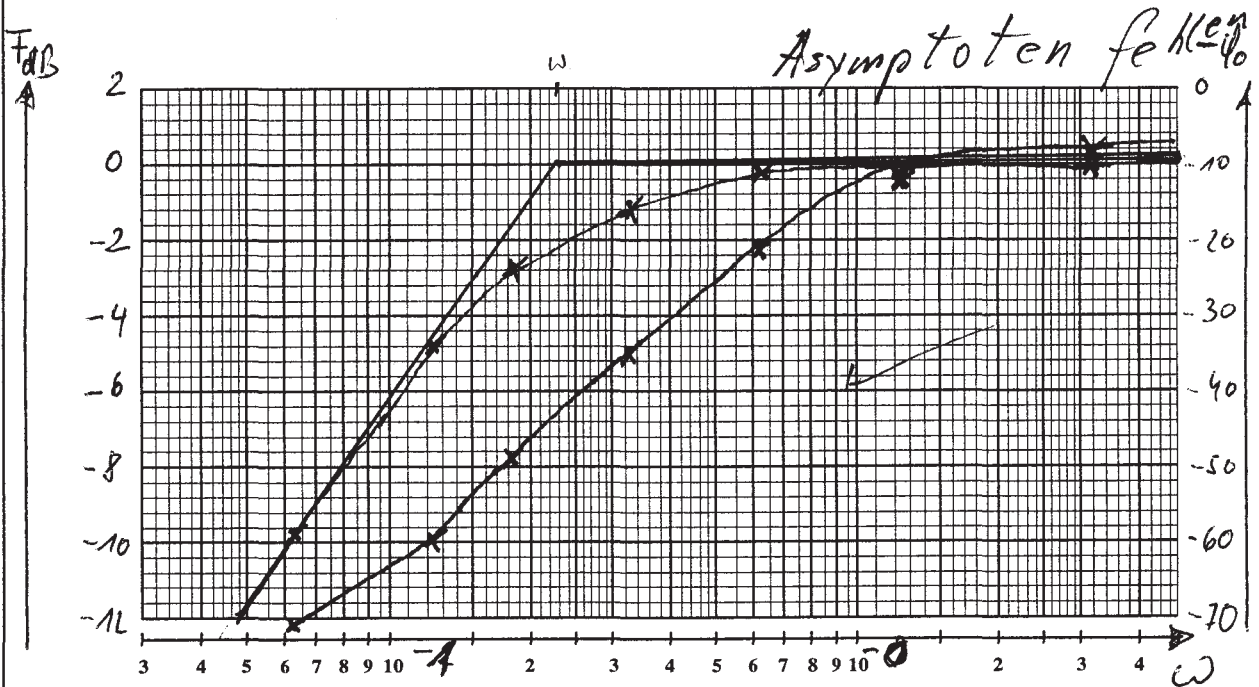
Ergebnisse der Auswertung für Schaltung 1

Tabelle 1		Meßergebnisse :			Berechnet :	
f / Hz	ω / s^{-1}	\hat{u}_a / \hat{u}_e	F / dB	$-\varphi / ^\circ$	F(j ω)	$\varphi / ^\circ$
0,01	0,0628	0,325	-9,76	-72,0	0,353	69,34
0,02	0,1257	0,584	-4,67	-59,4	0,602	52,98
0,03	0,1885	0,771	-2,87	-48,4	0,749	41,48
0,05	0,3142	0,868	-1,23	-35,6	0,883	27,95
0,1	0,6283	0,970	-0,26	-21,4	0,967	14,86
0,2	1,2566	0,995	-0,044	-10,5	0,991	7,55
0,5	3,1416	1,000	0	-8,8	0,999	3,04

3.1 Ortskurve



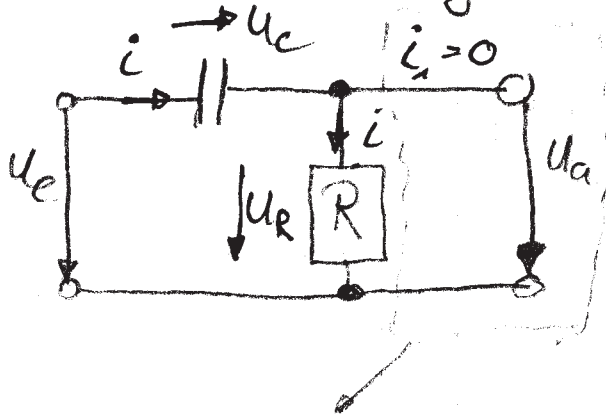
3.2 Amplitudengang $F_{dB}(\omega)$ und Phasengang $\varphi(\omega)$



3.3 Funktion des Frequenzganges

$-F_{dB}$ $-\varphi$
- Asymptoten

V.3.2 Schaltung 1



$$R = 1,5 \cdot 10^5 \Omega$$

$$C = 4 \cdot 10^{-5} F$$

Theoretisch: Annahme, dass der Schreiberinnenwiderstand gegen Unendlich geht
 $\Rightarrow i_1 = 0$ nach Spannungs- und Stromteilungsregel

$$1) u_c = \frac{1}{C} \int i dt$$

$$2) U_R = R \cdot i \Rightarrow i = \frac{U_R}{R}$$

$$3) U_e = U_c + U_R \quad \text{mit } U_R = U_A$$

$$\Rightarrow U_e = U_c + U_A$$

$$\Rightarrow U_c = \frac{1}{C} \int \frac{U_R}{R} dt = \frac{1}{C} \int \frac{U_A}{R} dt$$

$$U_e = \frac{1}{C} \int \frac{U_A}{R} dt + U_A$$

$$\dot{U}_e = \frac{1}{RC} U_A + \dot{U}_A$$

$$\Rightarrow RC \cdot \dot{U}_A(t) + U_A(t) = RC \cdot \dot{U}_e(t)$$

$$RC = T = 1,5 \cdot 10^5 \Omega \cdot 4 \cdot 10^{-5} F = \underline{\underline{6s}}$$

$$T \cdot \dot{u}_a(t) + u_a(t) = T u_e(t)$$

$$F(s) = \frac{u_a(s)}{u_e(s)} = \frac{T \cdot s}{T s + 1} = \frac{6s \cdot s}{1 + 6s \cdot s}$$

$$\omega = \frac{1}{T} = \frac{1}{6s} = 0,166 \frac{1}{s}$$

$$s \rightarrow j\omega \Rightarrow F(j\omega) = \underbrace{6s}_{D} j\omega \underbrace{\frac{1}{1+6s j\omega}}_{PT_1}$$

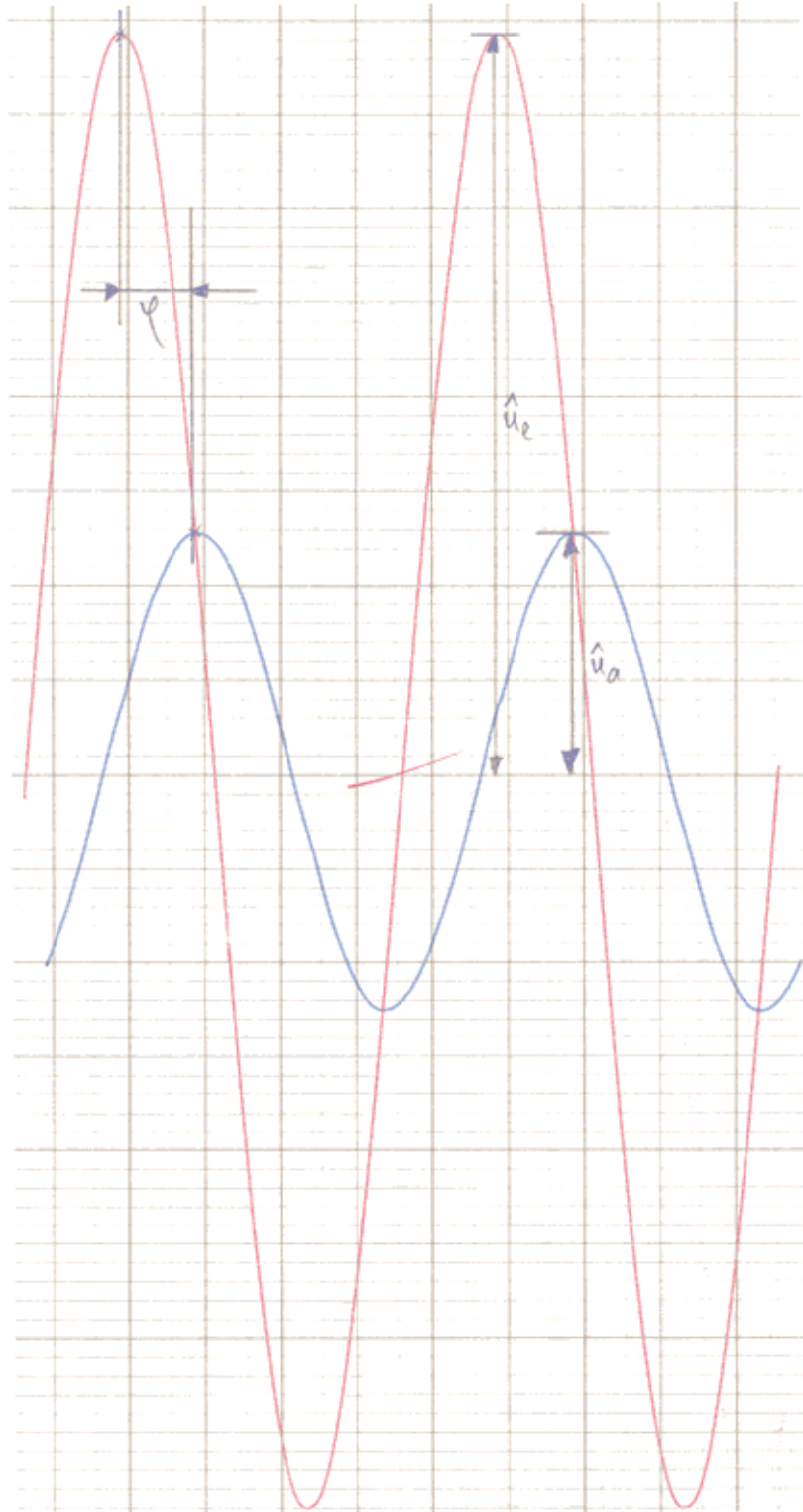
$\underbrace{\hspace{10em}}_{DT_1}$

$$|F(j\omega)| = \frac{\omega \cdot T}{\sqrt{1 + (\omega \cdot T)^2}} \quad \text{Betragsfunktion}$$

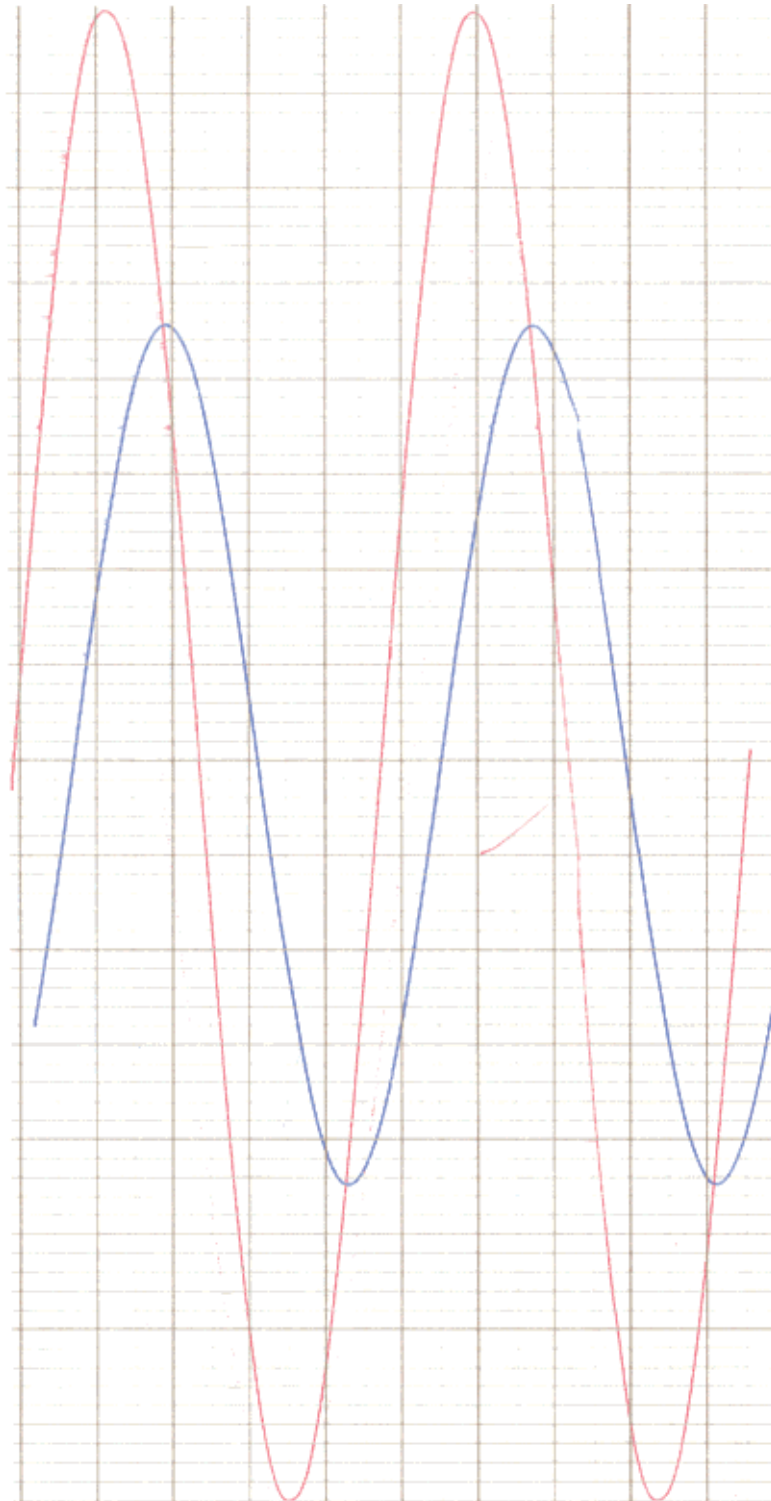
$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{\omega \cdot T}{0}\right) - \arctan\left(\frac{\omega T}{1}\right) \quad \text{Phasenfunktion}$$

$$= 90^\circ - \arctan(\omega T)$$

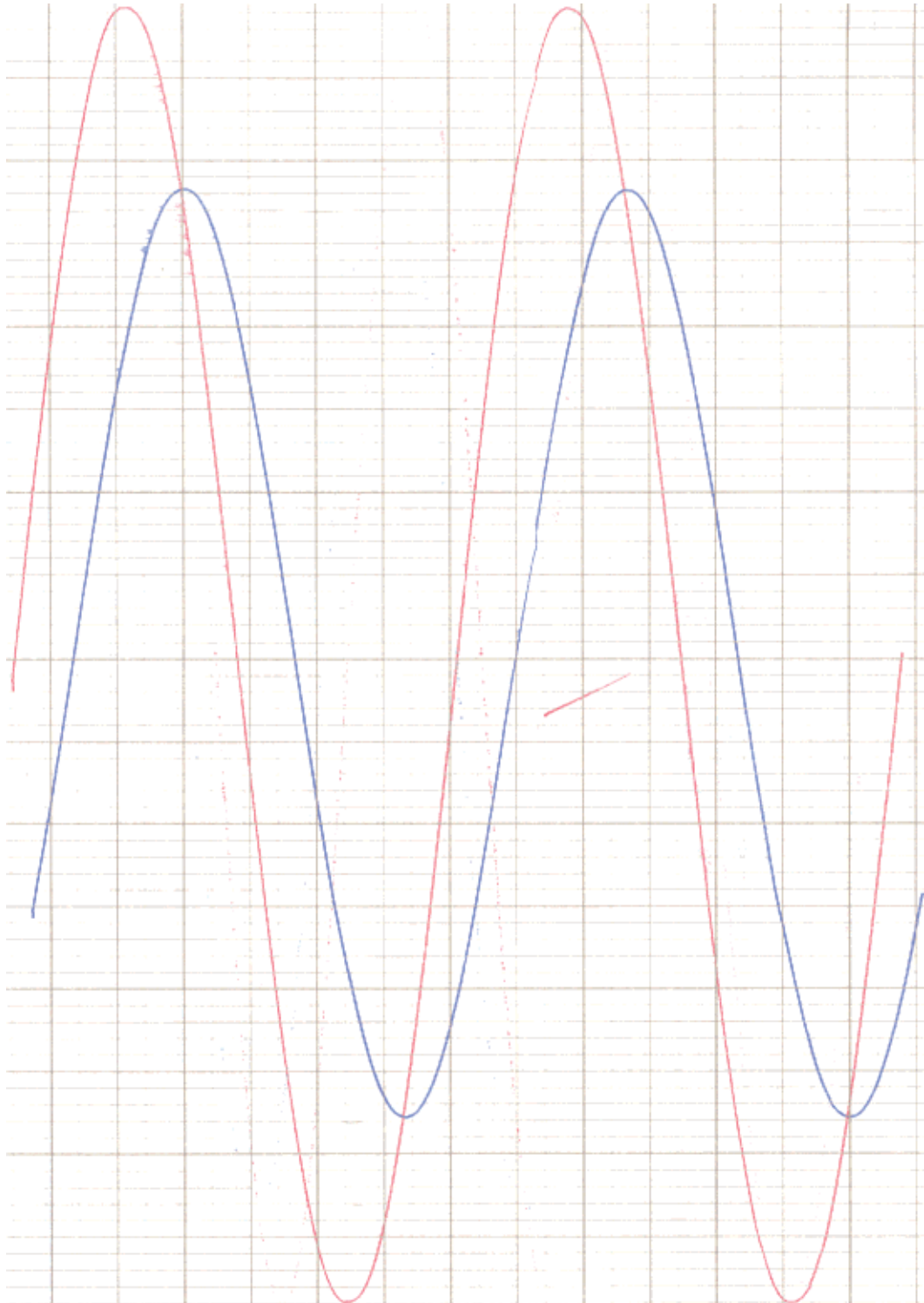
V 3.2, Schaltung 1, $f = 0,01 \text{ Hz}$



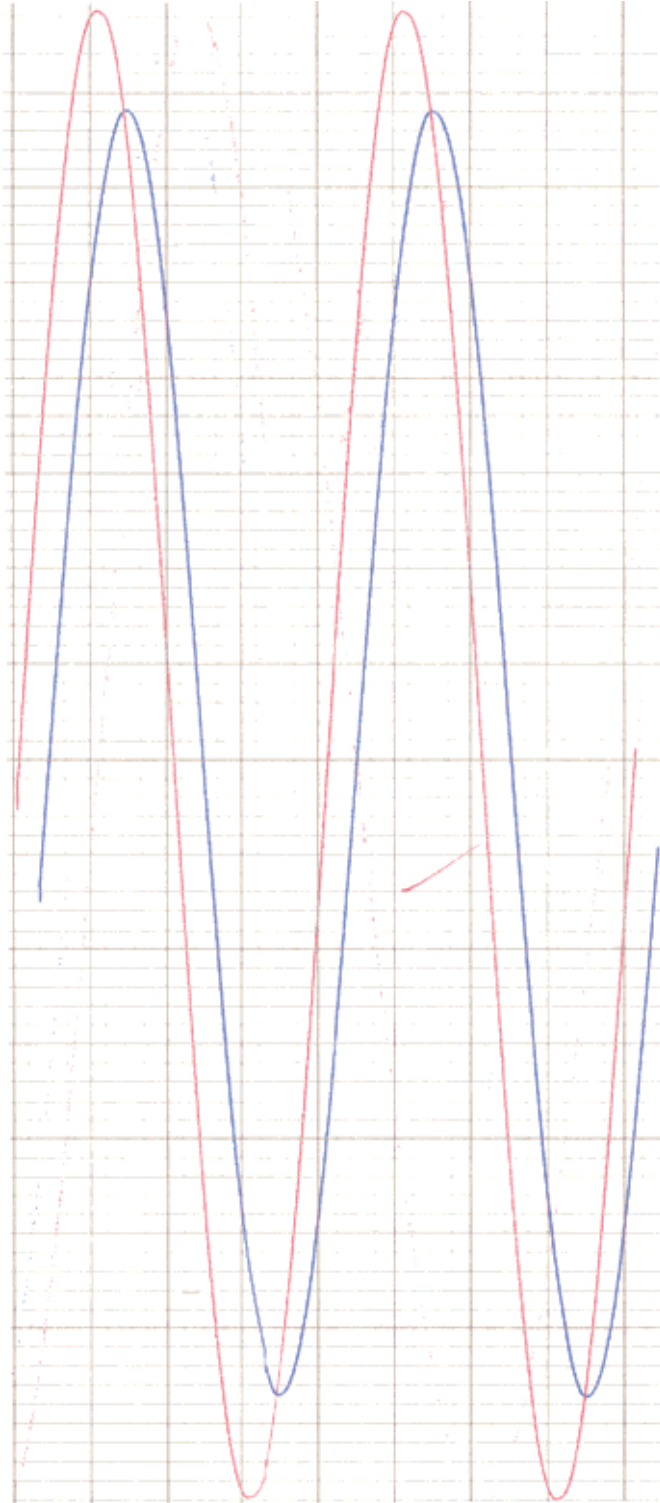
V 3.2, Schaltung 1, $f = 0,02 \text{ Hz}$



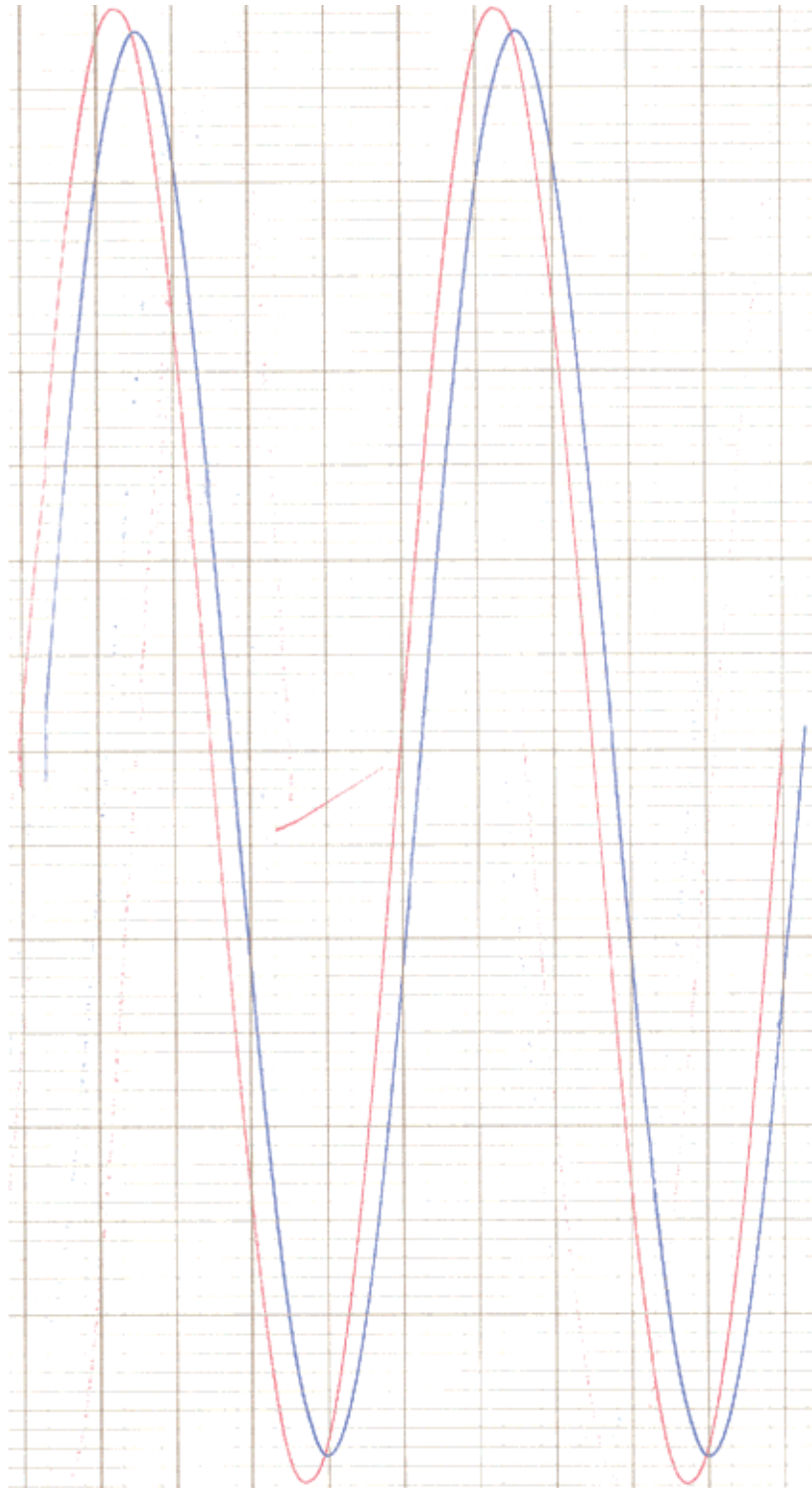
V 3.2, Schaltung 1, $f = 0,03 \text{ Hz}$



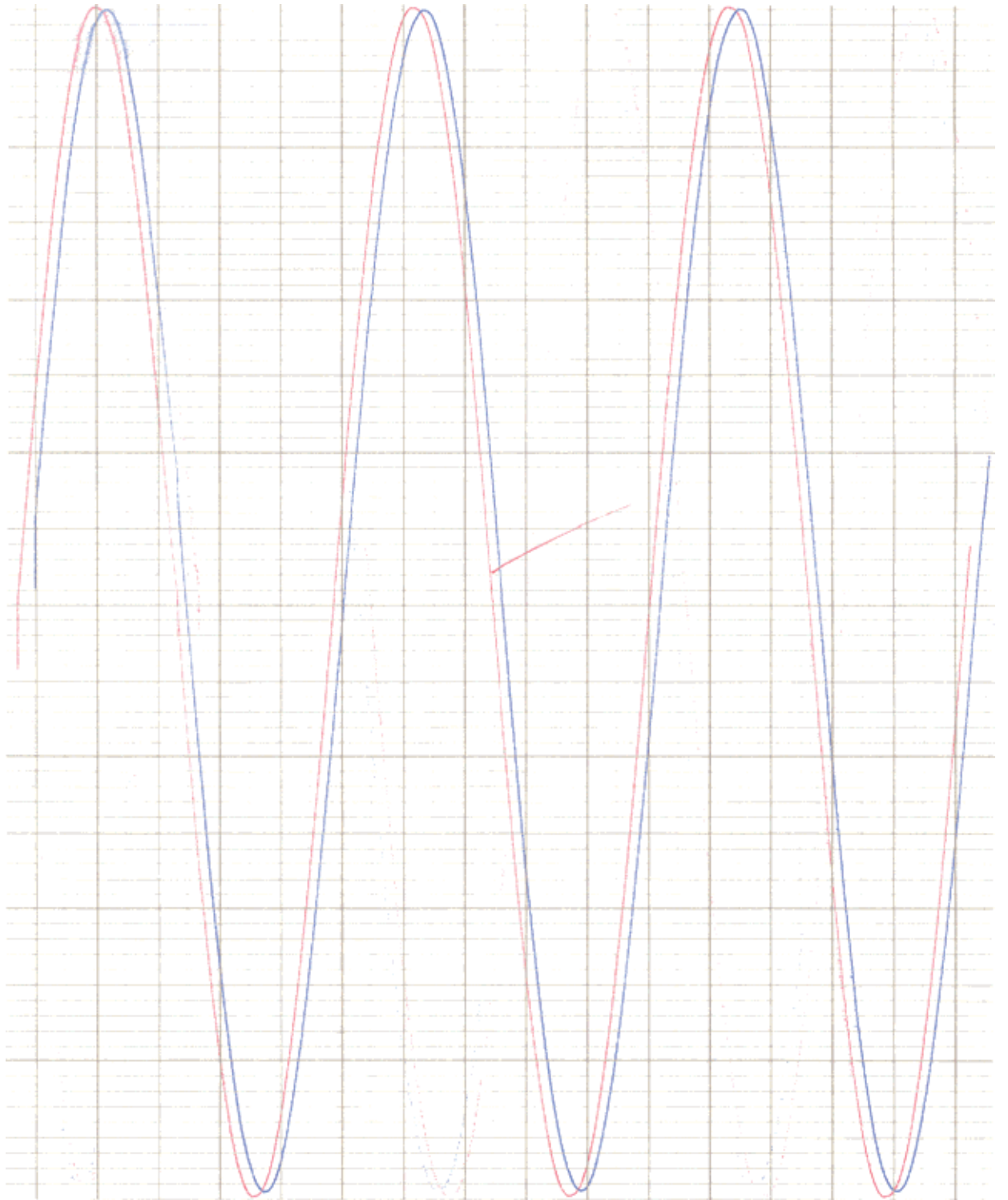
V 3.2, Schaltung 1, $f = 0,05 \text{ Hz}$



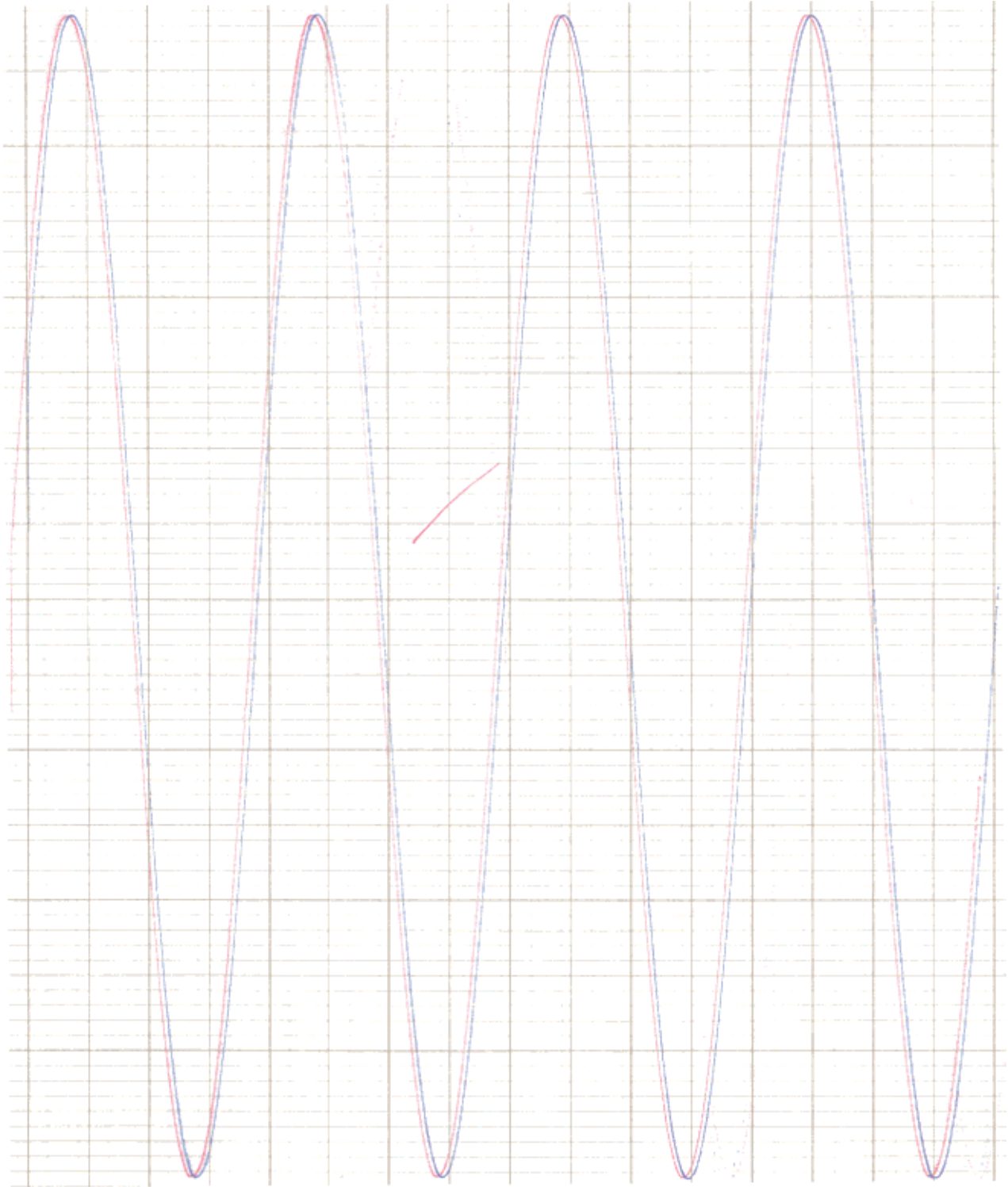
V 3.2, Schaltung 1, $f = 0,1 \text{ Hz}$



V 3.2, Schaltung 1, $f = 0,2 \text{ Hz}$



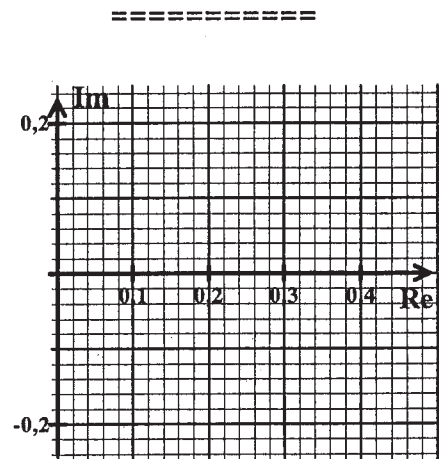
V 3.2, Schaltung 1, $f = 0,5 \text{ Hz}$



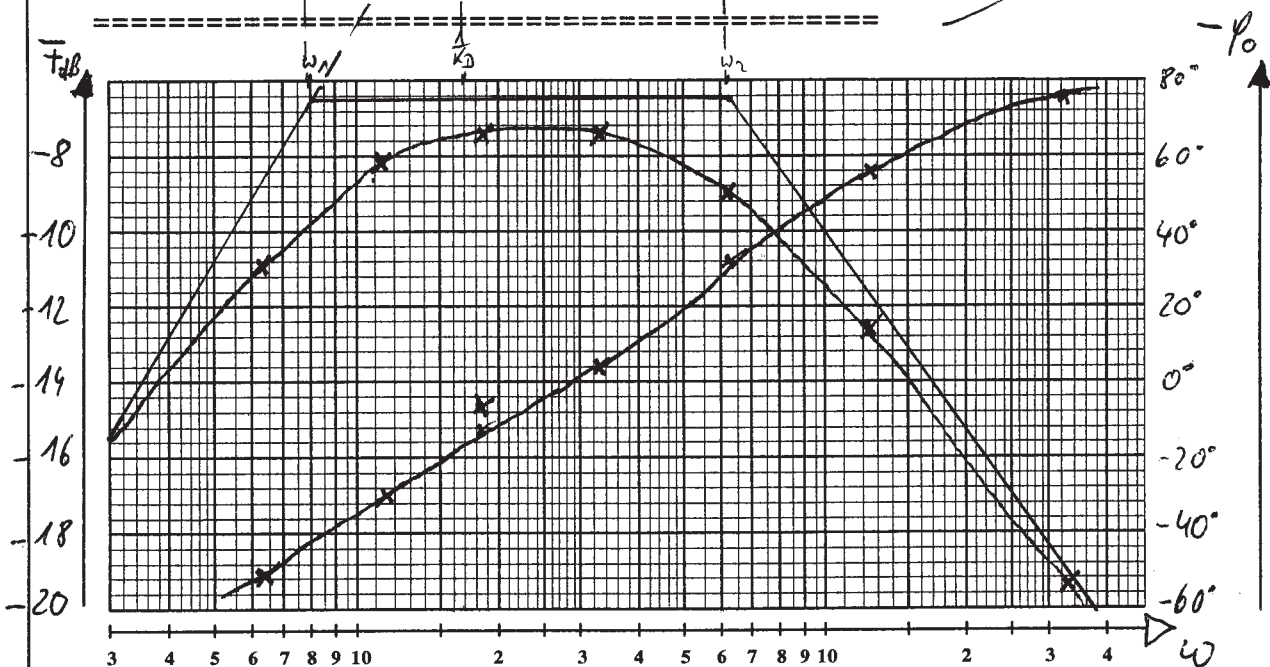
Ergebnisse der Auswertung für Schaltung 2

Tabelle 1		Meßergebnisse :			Berechnet :	
f / Hz	ω / s^{-1}	\hat{u}_a / \hat{u}_e	F / dB	$-\phi_{\circ}$	F(j ω)	ϕ_{\circ}
0,01	0,0628	0,284	-10,93	-51,4	0,305	48,67
0,02	0,1257	0,391	-8,16	-28,2	0,423	23,66
0,03	0,1885	0,426	-7,41	-13,2	0,457	8,37
0,05	0,3142	0,426	-7,41	4,4	0,453	-10,76
0,1	0,6283	0,355	-9,00	32,1	0,369	-36,78
0,2	1,2566	0,234	-12,62	56,5	0,236	-59,28
0,5	3,1416	0,107	-19,41	76,5	0,104	-76,98

3.1 Ortskurve



3.2 Amplitudengang / F_{dB}(ω) und Phasengang $\phi(\omega)$

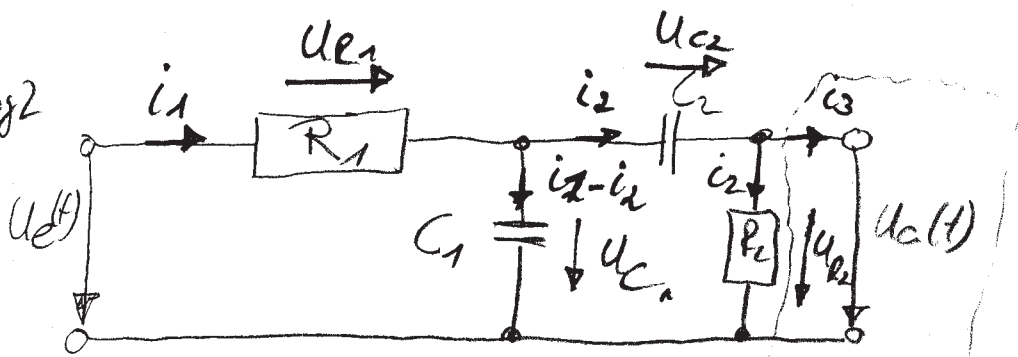


3.3 Funktion des Frequenzganges

$\overset{1,0}{-F_{dB}} \quad -\phi$

- Asymptoten (Konstruktion ermittelt, dabei wurde der Maßstab etwas umgedreht gewählt)

V.3.2
Schaltung 2



theoretisch: Annahme, dass der Schreiberrinnenwiderstand
gegen unendlich geht. $\Rightarrow i_3 = 0$

- 1) $R_1: u_{R_1} = R_1 \cdot i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{u_{R_1}}{R_1}$
- 2) $R_2: u_{R_2} = R_2 \cdot i_2 \Rightarrow i_2 = \frac{u_{R_2}}{R_2} = \frac{u_a}{R_2}$
- 3) $C_1: u_{C_1} = \frac{1}{C_1} \cdot \int (i_1 - i_2) dt$
- 4) $C_2: u_{C_2} = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt$
- 5) $u_a = u_{R_2}$
- 6) $u_e = u_{C_1} + u_{R_2}$
- 7) $u_{C_1} = u_a + u_{C_2}$

3) in 6) und 7)

$$u_e = \frac{1}{C_1} \int (i_1 - i_2) dt + R_1 i_1 \quad 8)$$

$$\frac{1}{C_1} \int (i_1 - i_2) dt = u_a + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt \quad 9)$$

2) in 8) und 9) jeweils differenziert

$$\dot{u}_e = \frac{1}{C_1} \left(i_1 - \frac{u_a}{R_2} \right) + R_1 \frac{di_1}{dt} \quad 10)$$

$$\frac{1}{C_1} \left(i_1 - \frac{u_a}{R_2} \right) - \dot{u}_a = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{u_a}{R_2} \quad 11)$$

$$\hookrightarrow i_1 = \frac{C_1}{C_2 \cdot R_2} \cdot u_a + C_1 \dot{u}_a + \frac{u_a}{R_2} \quad 12)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{C_1}{C_2 R_2} \cdot \dot{u}_a + \ddot{u}_a C_1 + \frac{1}{R_2} \cdot \dot{u}_a \quad (13)$$

12) und 13) in 10)

$$\dot{u}_e = \frac{1}{C_1} \left(\frac{C_1}{R_2 C_2} \cdot u_a + C_1 \cdot \dot{u}_a + \frac{u_a}{R_2} - \frac{u_a}{R_2} \right) +$$

$$R_1 \cdot \left(\frac{C_1}{C_2 R_2} \cdot \dot{u}_a + \ddot{u}_a C_1 + \frac{1}{R_2} \cdot \dot{u}_a \right)$$

$$\dot{u}_e = \frac{1}{R_2 C_2} u_a + \dot{u}_a + \frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} \ddot{u}_a + R_1 C_1 \dot{u}_a + \frac{R_1}{R_2} \dot{u}_a \quad | \cdot R_2 C_2$$

$$R_2 C_2 \dot{u}_e = u_a + R_2 C_2 \dot{u}_a + R_1 C_1 \ddot{u}_a + R_1 C_1 R_2 C_2 \dot{u}_a + R_1 C_2 \dot{u}_a$$

$$R_1 C_1 R_2 C_2 \ddot{u}_a(t) + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) \cdot \dot{u}_a(t) + u_a(t) = R_2 C_2 \dot{u}_e(t)$$

vereinfacht durch

$$T_1 = R_1 C_1 = 1 \cdot 10^5 \Omega \cdot 3 \cdot 10^{-5} F = \underline{\underline{3s}}$$

$$T_2 = R_2 C_2 = 1,5 \cdot 10^5 \Omega \cdot 4 \cdot 10^{-5} F = \underline{\underline{6s}}$$

$$T_{12} = R_1 C_2 = 1 \cdot 10^5 \Omega \cdot 4 \cdot 10^{-5} F = \underline{\underline{4s}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T_1 T_2} \ddot{u}_a(t) + (T_1 + T_2 + T_{12}) \cdot \dot{u}_a(t) + u_a(t) = T_2 \dot{u}_e(t)$$

Übertragungsfkt:

$$F(s) = \frac{u_a}{u_e} = \frac{s T_2}{T_1 \cdot T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + T_{12}) \cdot s + 1} = \frac{6s \cdot 5}{18s^2 s^2 + 13s s + 1}$$

Pole des Nenners

$$s_{P1/2} = \frac{-13s \pm \sqrt{(13s)^2 - 4 \cdot 18s^2 \cdot 1}}{2 \cdot 18s^2} =$$

$$s_{P1} = -0,6347 \text{ s}^{-1} \quad s_{P2} = -0,0875 \text{ s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \bar{F}(s) &= \frac{\frac{6s}{18s^2} \cdot s}{(s + 0,0875s^{-1})(s + 0,6347s^{-1})} \\ &= \frac{\frac{1}{3}s^{-1} \cdot s}{0,6347 \cdot 0,0875s^{-2}} \\ &= \frac{1}{0,6347 \cdot 0,0875} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{1}{0,0875s^{-1}}s)(1 + \frac{1}{0,6347s^{-1}}s)} \end{aligned}$$

$$= \frac{6s}{(1 + 11,424s)(1 + 1,5755s)} \quad (\text{Zeitkonstantenform})$$

$\rightarrow (s \rightarrow j\omega)$

$$F(j\omega) = \underbrace{6s}_{D} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + 11,424s}}_{PT_1} + \underbrace{\frac{1}{1 + 1,5755s}}_{PT_1}$$

$\Downarrow T_1$

$$K_D = 6$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = 0,0875 \frac{1}{s}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} = 0,6347 \frac{1}{s}$$

Betragsfkt:

$$|F(j\omega)| = \frac{6s \cdot \omega}{\sqrt{1 + (11,424s\omega)^2} \cdot \sqrt{1 + (1,5755s\omega)^2}}$$

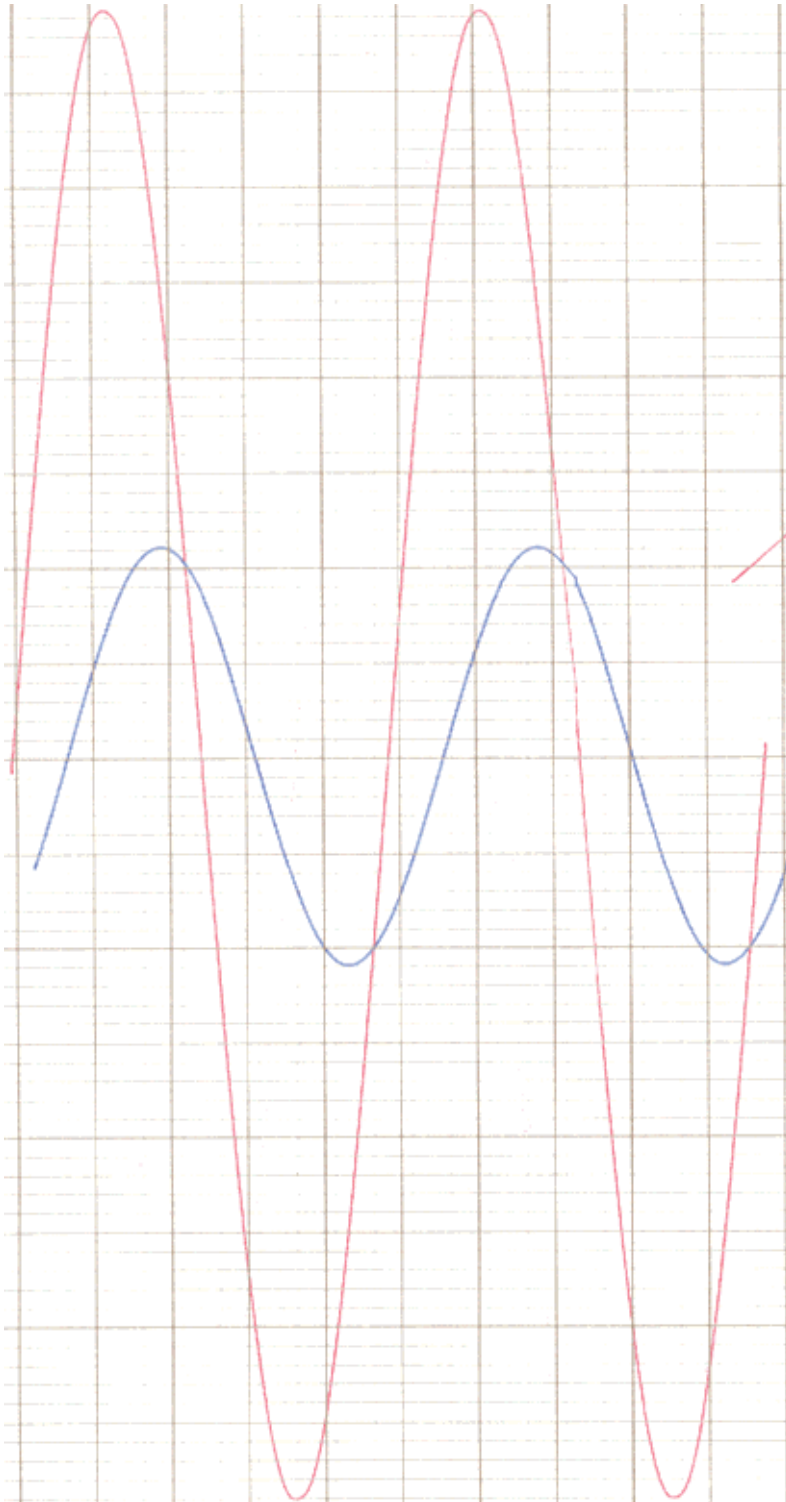
Phasenfunktion:

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{6s \cdot \omega}{0}\right) - \arctan\left(\frac{11,424s \cdot \omega}{1}\right)$$

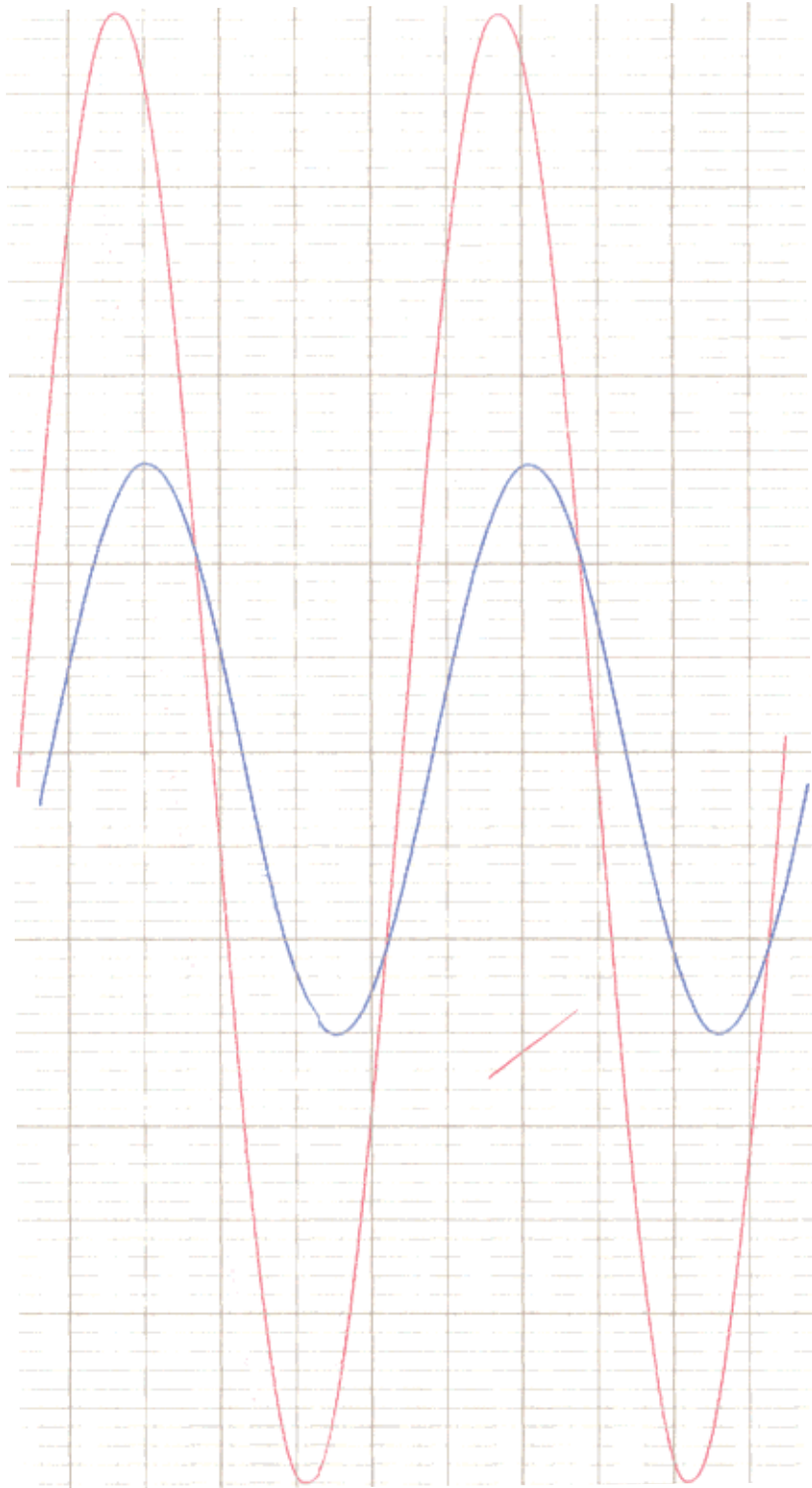
$$- \arctan\left(\frac{1,5755s\omega}{1}\right)$$

$$= 90^\circ - \arctan\left(\frac{11,424s\omega}{1}\right) - \arctan\left(\frac{1,5755s\omega}{1}\right)$$

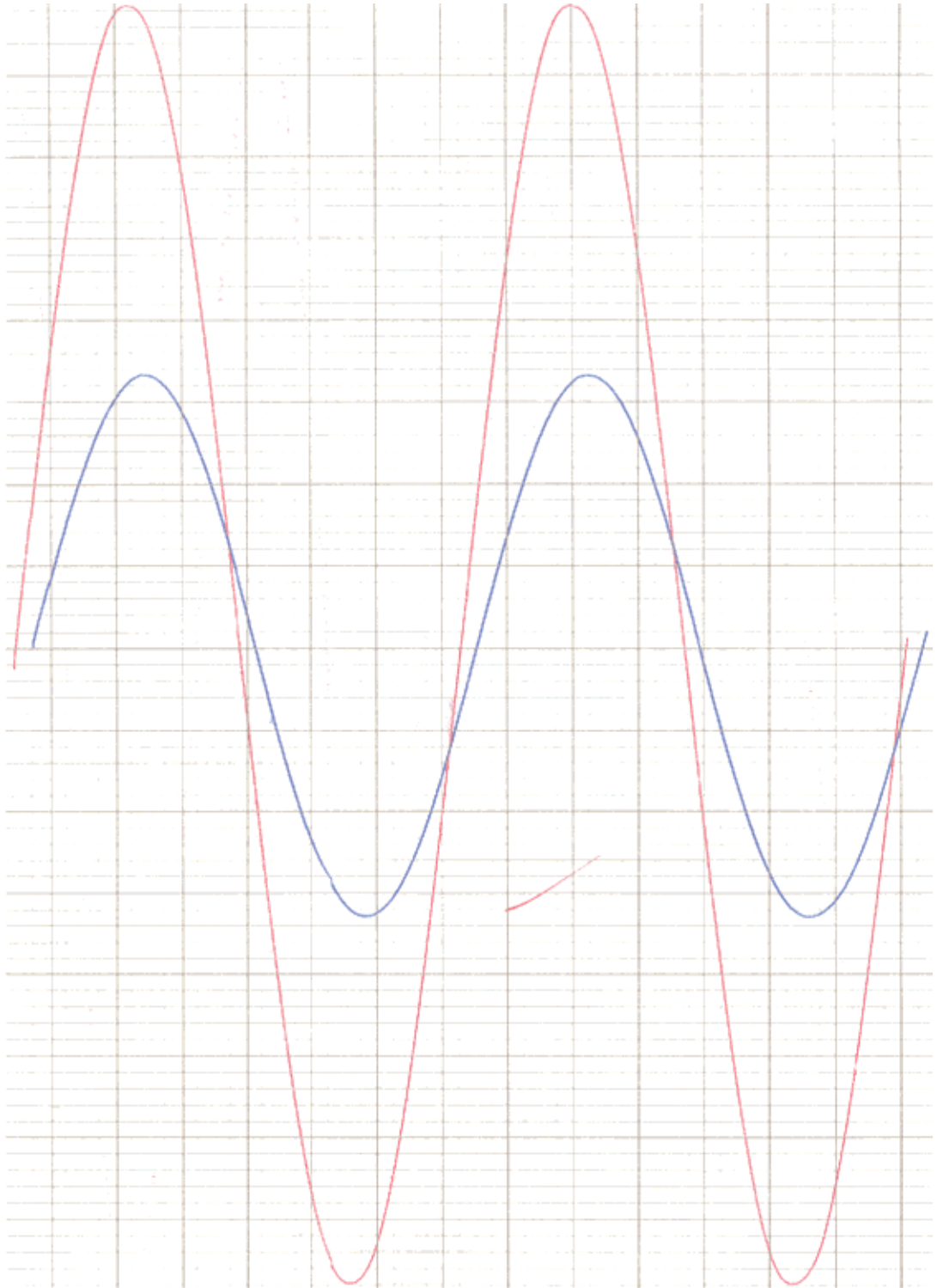
V 3.2, Schaltung 2, $f = 0,01$ Hz



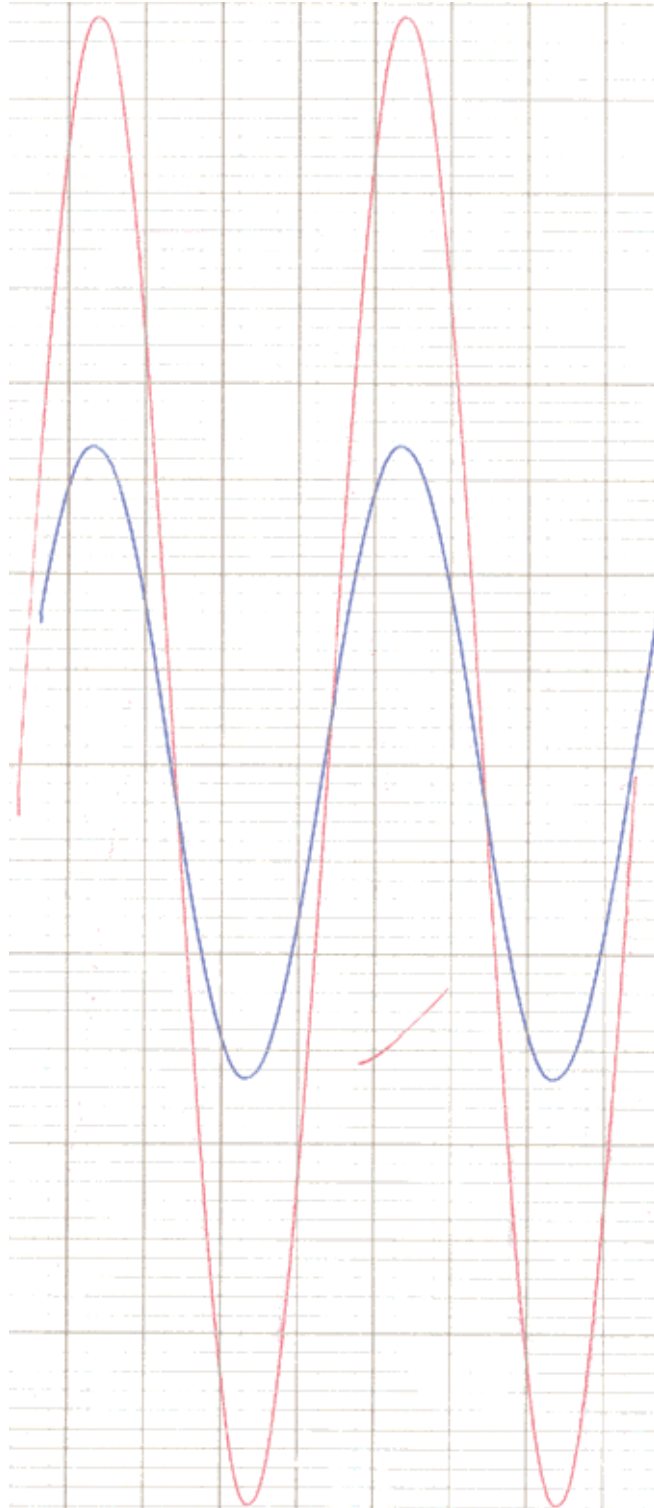
V 3.2, Schaltung 2, $f = 0,02 \text{ Hz}$



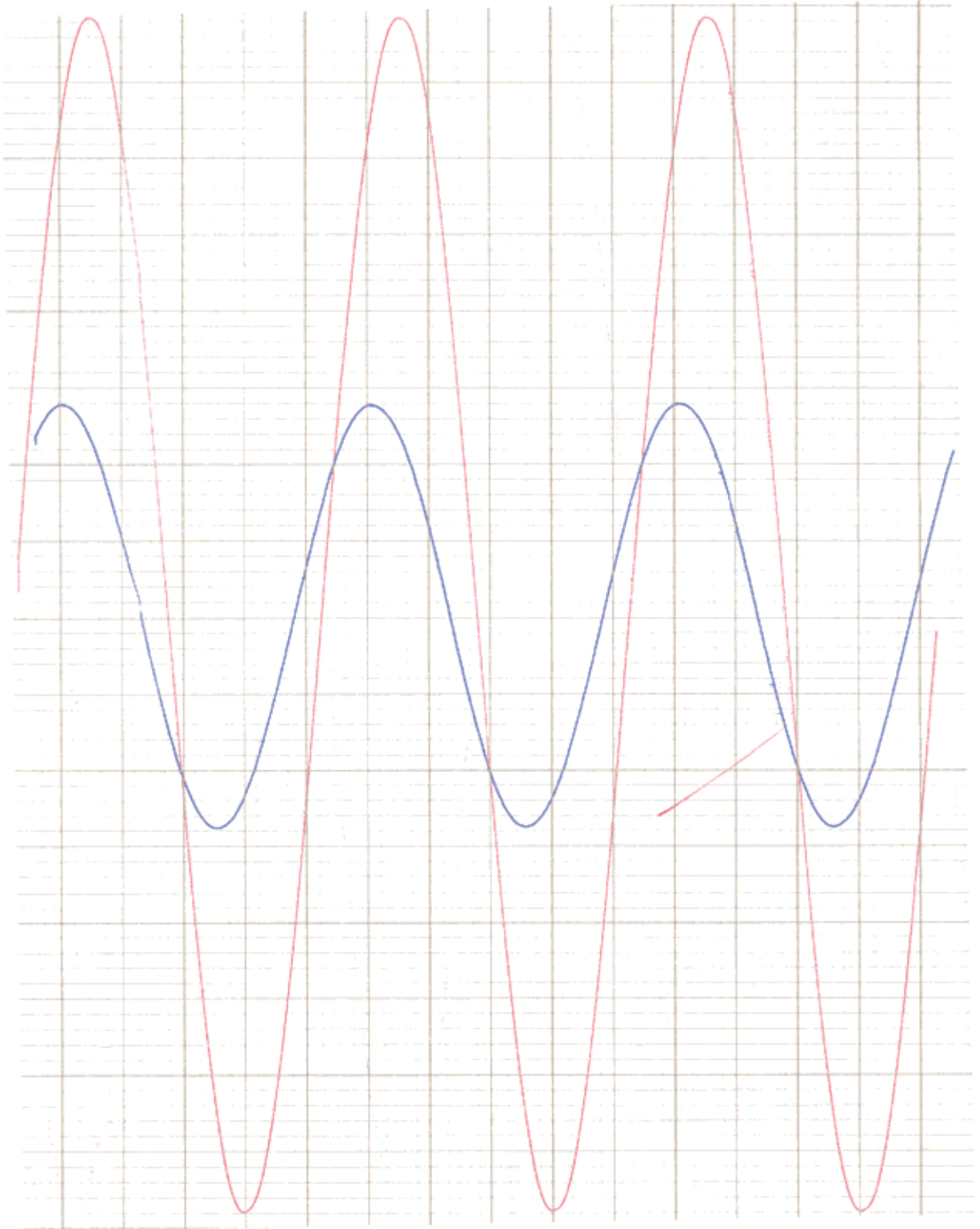
V 3.2, Schaltung 21, $f = 0,03 \text{ Hz}$



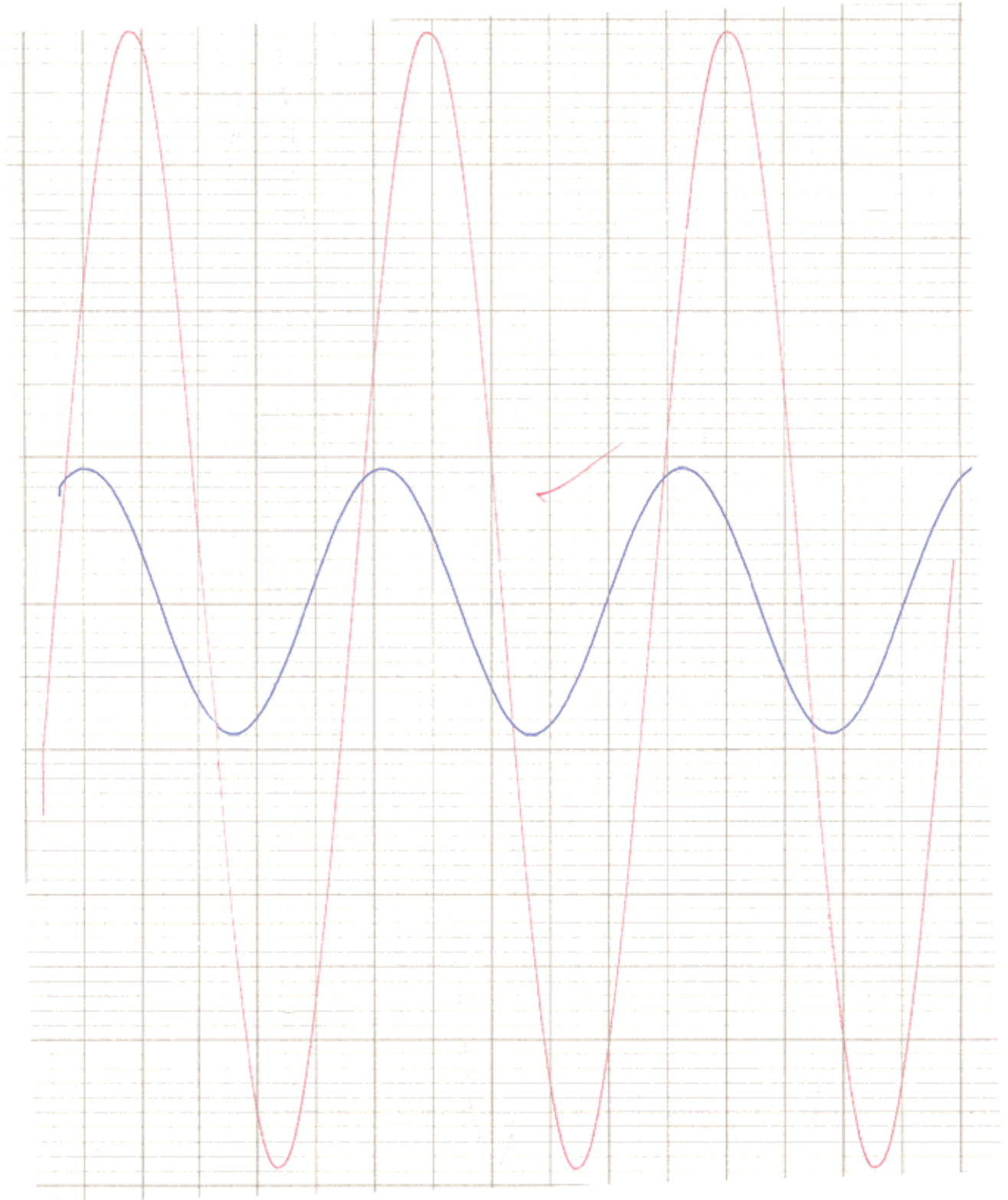
V 3.2, Schaltung 2, $f = 0,05 \text{ Hz}$



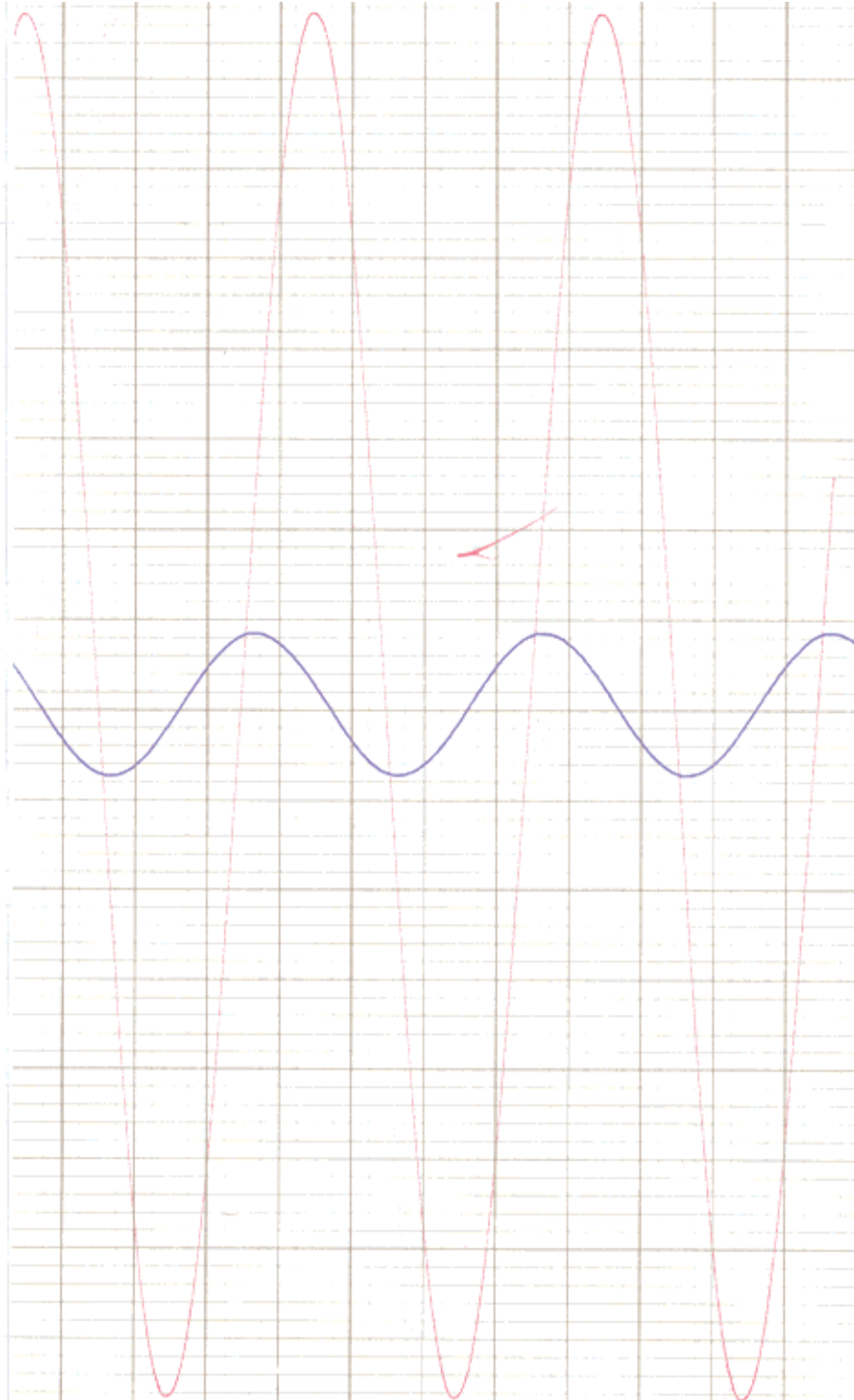
V 3.2, Schaltung 2, $f = 0,1 \text{ Hz}$



V 3.2, Schaltung 2, $f = 0,2 \text{ Hz}$



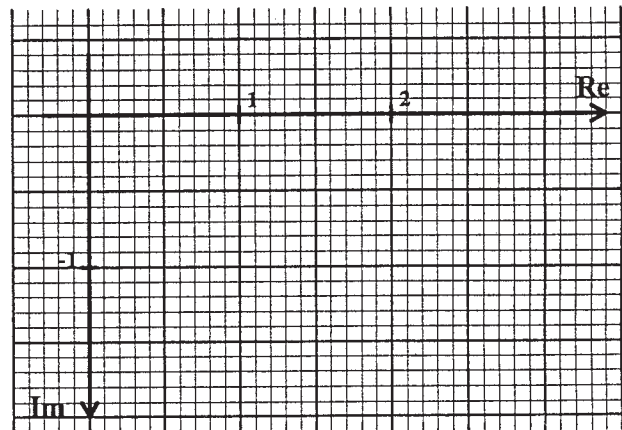
V 3.2, Schaltung 2, $f = 0,5 \text{ Hz}$



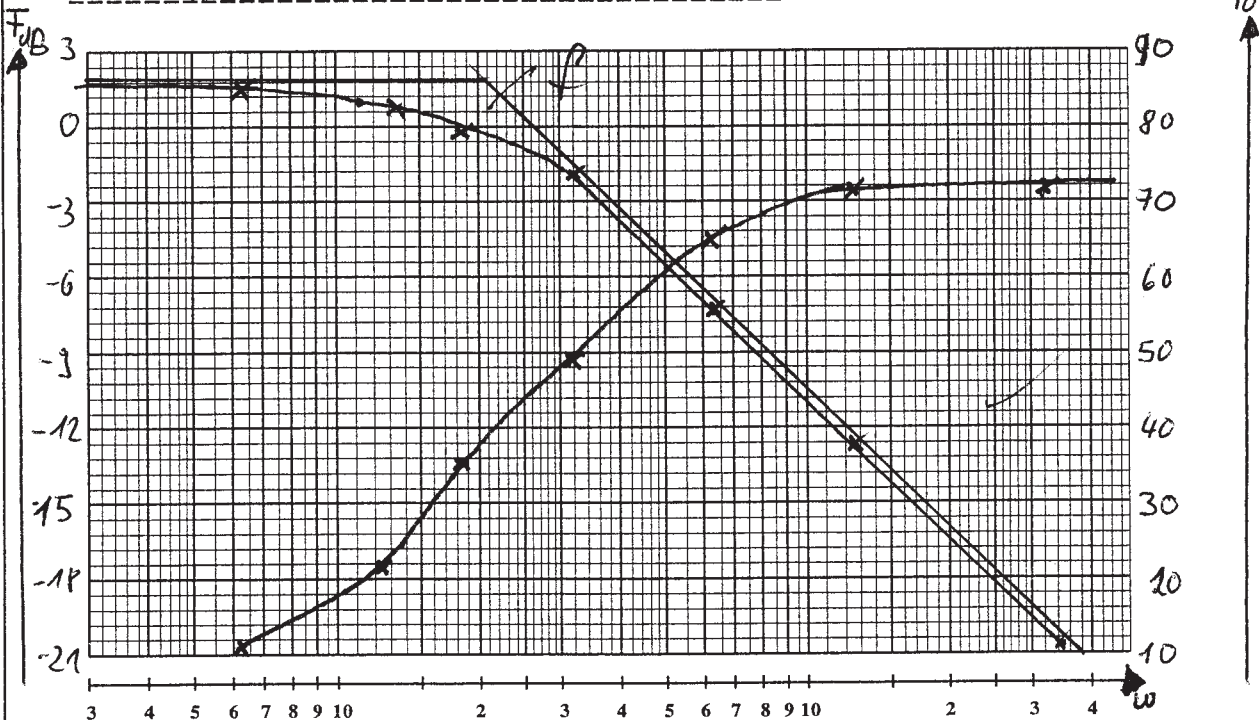
Ergebnisse der Auswertung für Baustein 1

Tabelle 1		Meßergebnisse :		
f/Hz	ω/s^{-1}	\hat{u}_a / \hat{u}_e	F/dB	$\pm \varphi, \circ$
0,01	0,0628	1,186	1,48	$\rightarrow 109$
0,02	0,1257	1,093	0,77	$\rightarrow 21,6$
0,03	0,1885	0,977	-0,20	$\rightarrow 35,5$
0,05	0,3142	0,791	-2,04	$\rightarrow 48,9$
0,1	0,6283	0,430	-7,33	$\rightarrow 64,8$
0,2	1,2566	0,233	-12,67	$\rightarrow 70,6$
0,5	3,1416	0,093	-20,63	$\rightarrow 71,1$

3.1 Ortskurve



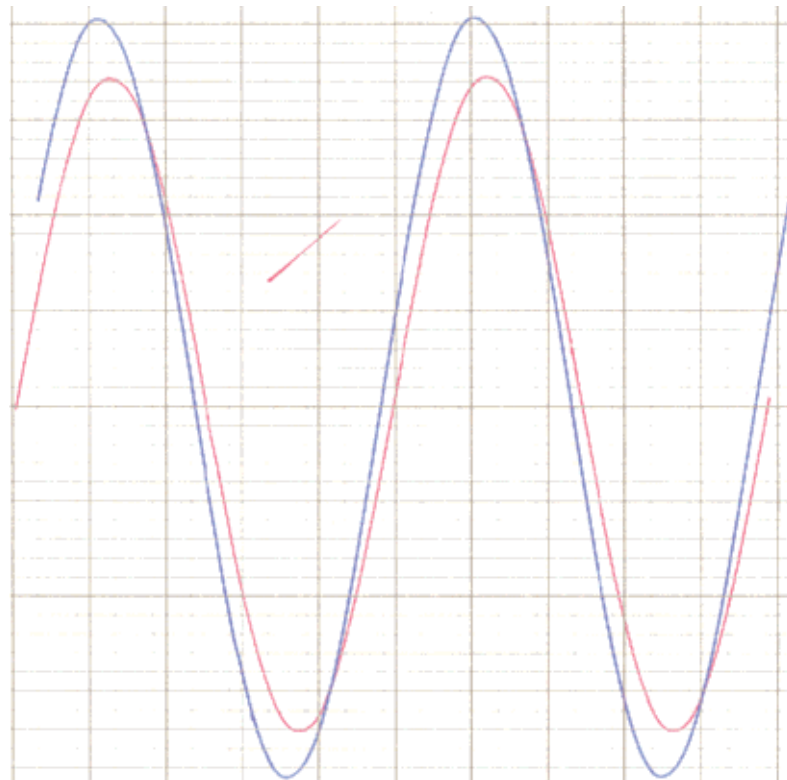
3.2 Amplitudengang $F_{dB}(\omega)$ und Phasengang $\varphi(\omega)$



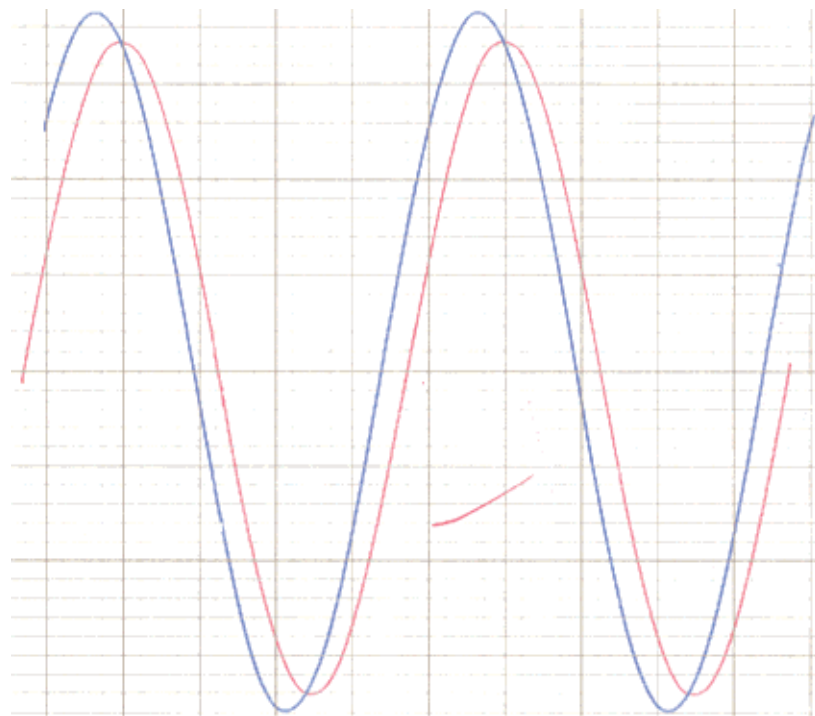
Diskussion

$-F_{dB}$ $-\varphi_0$
 -Asymptoten

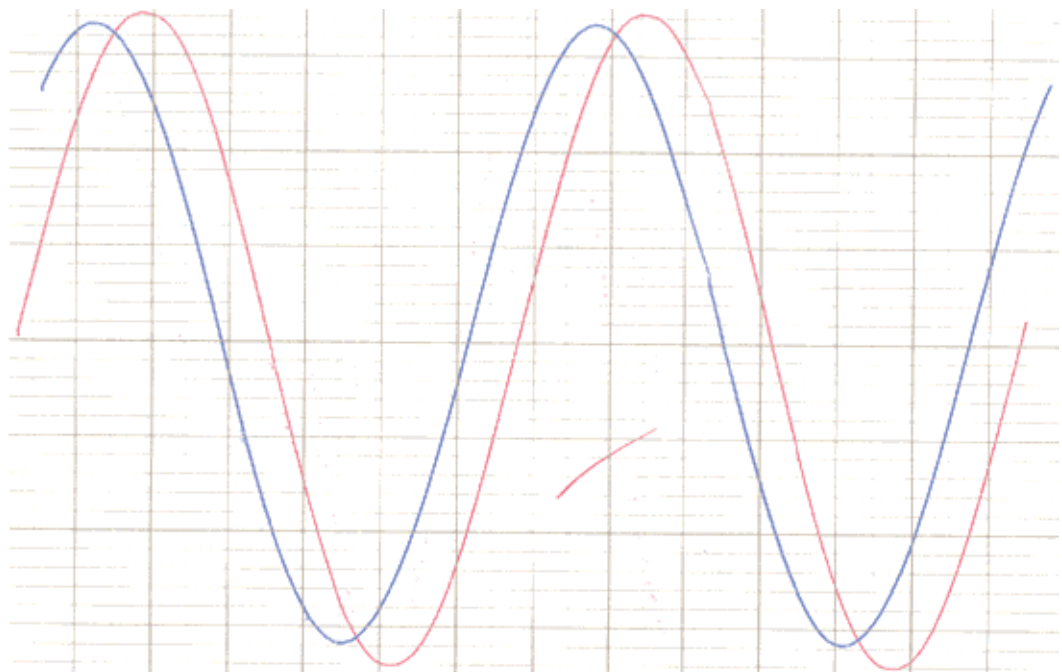
V 3.2, Baustein 1, $f = 0,01$ Hz



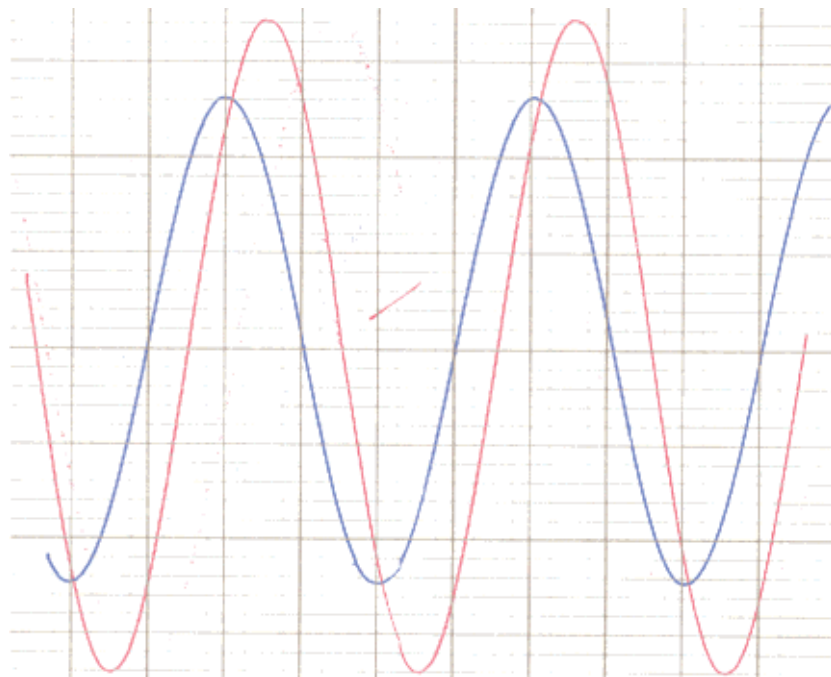
V 3.2, Baustein 1, $f = 0,02 \text{ Hz}$



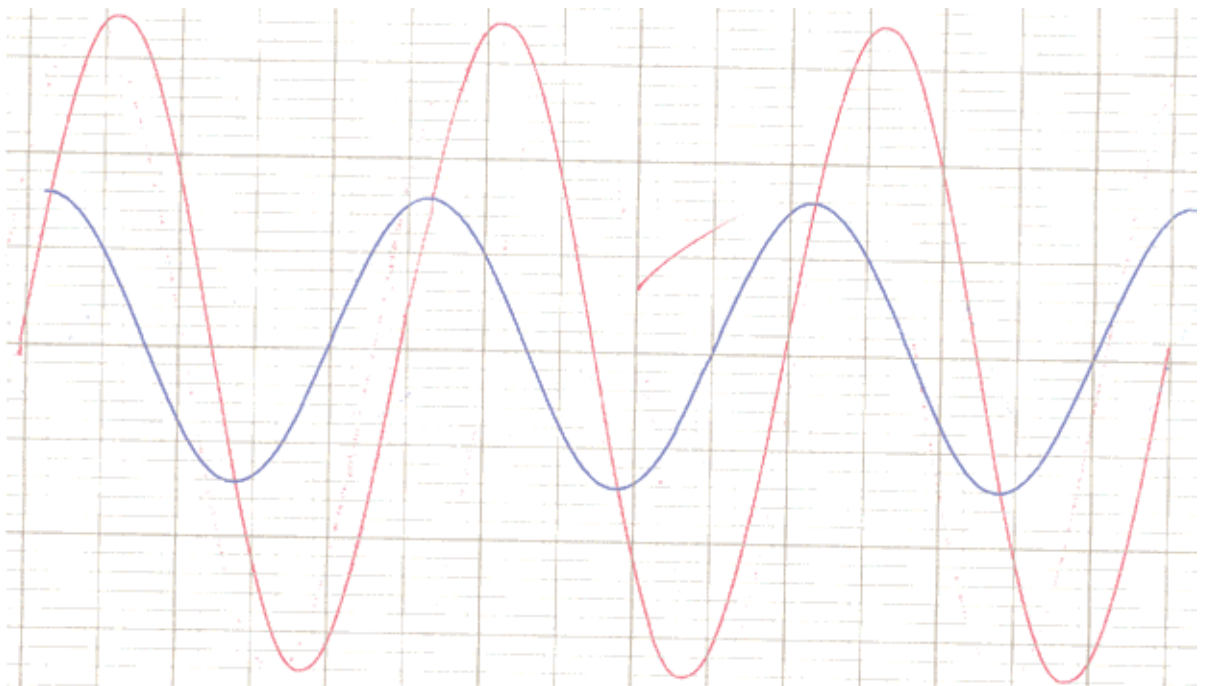
V 3.2, Baustein 1, $f = 0,03 \text{ Hz}$



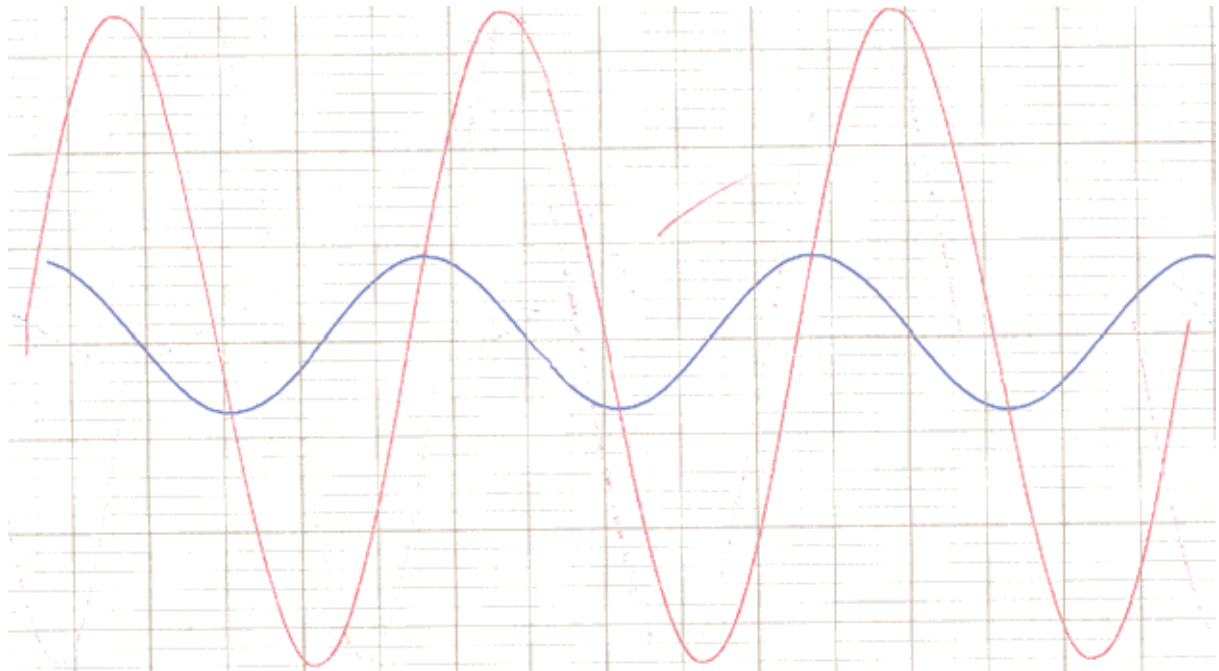
V 3.2, Baustein 1, $f = 0,05 \text{ Hz}$



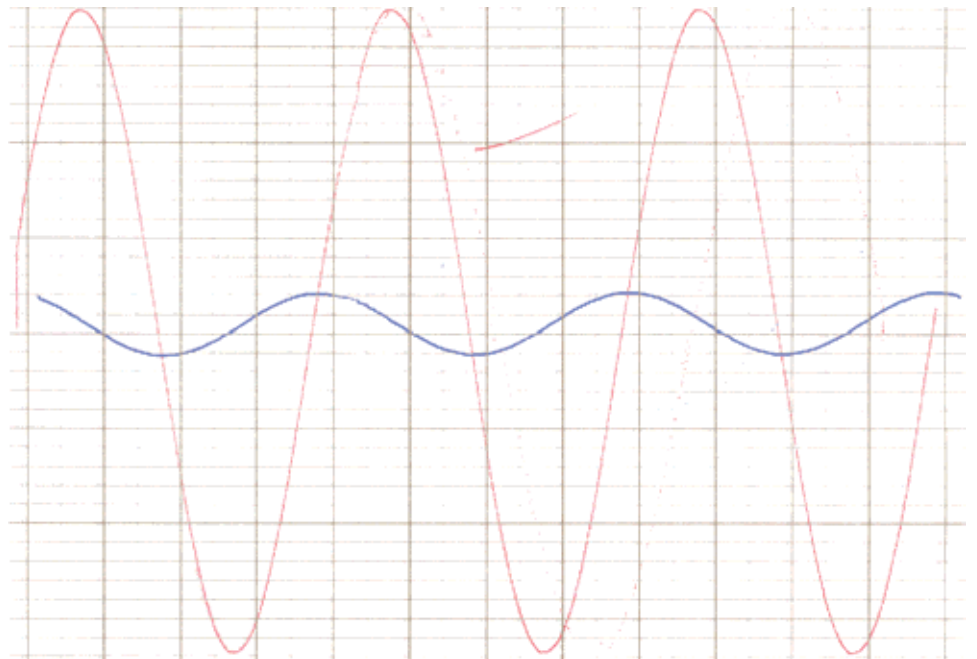
V 3.2, Baustein 1, $f = 0,1 \text{ Hz}$



V 3.2, Baustein 1, $f = 0,2 \text{ Hz}$



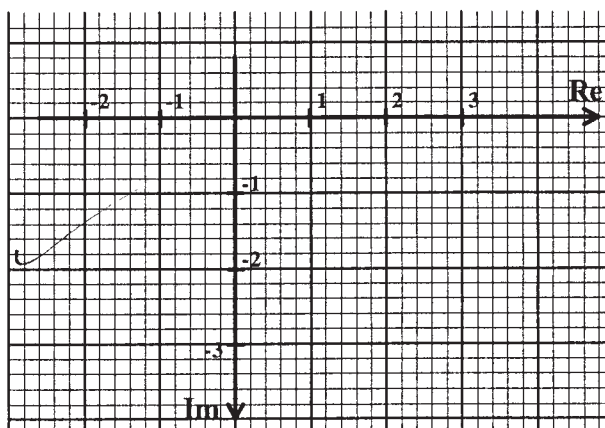
V 3.2, Baustein 1, $f = 0,5 \text{ Hz}$



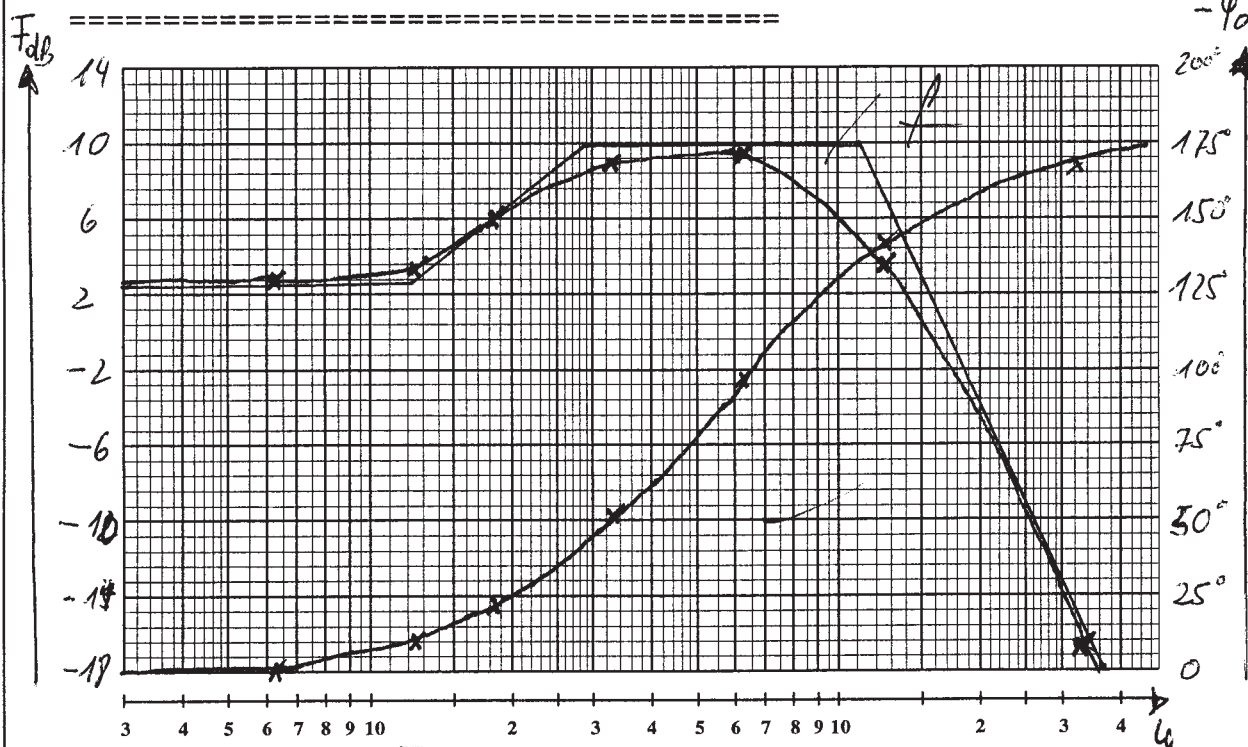
Ergebnisse der Auswertung für Baustein 2

Tabelle 1		Aus Messung :		
f / Hz	ω / s^{-1}	\hat{u}_a / \hat{u}_e	F / dB	$-\varphi / ^\circ$
0,01	0,0628	1,341	2,55	0
0,02	0,1257	1,482	3,42	+10,6
0,03	0,1885	1,976	5,92	+21,5
0,04	0,2512	2,800	8,94	+52,9
0,05	0,3142	2,929	9,34	+97,8
0,06	1,2566	1,529	3,69	+139,6
0,15	3,1416	0,141	-17,00	+167,0

3.1 Ortskurve



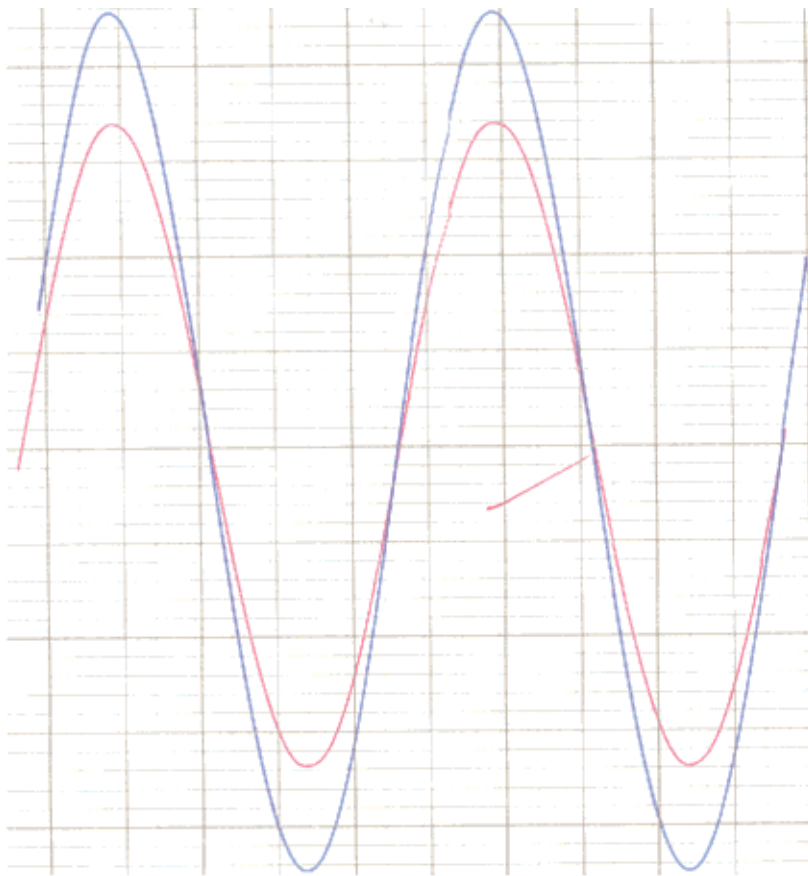
3.2 Amplitudengang $F_{dB}(\omega)$ und Phasengang $\varphi(\omega)$



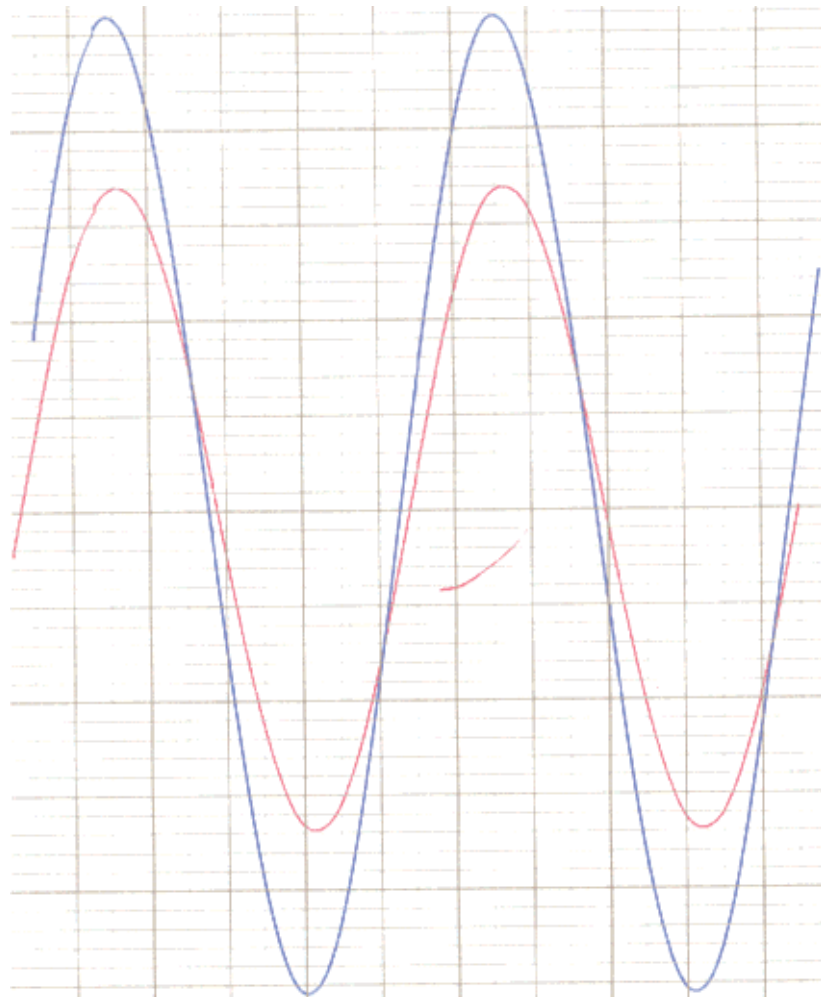
Diskussion

- F_{dB} - φ
 - Asymptoten

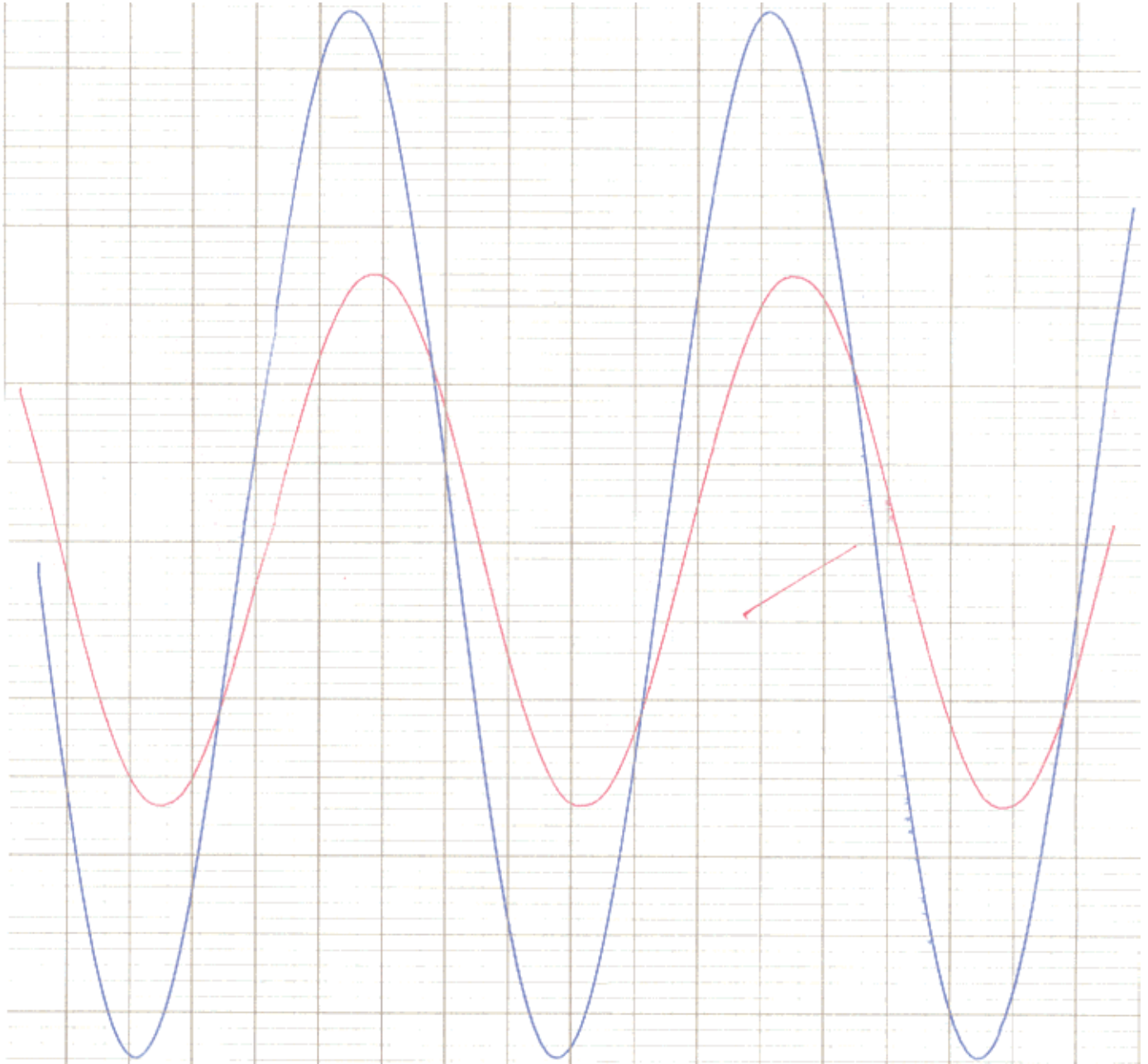
V 3.2, Baustein 2, $f = 0,01$ Hz



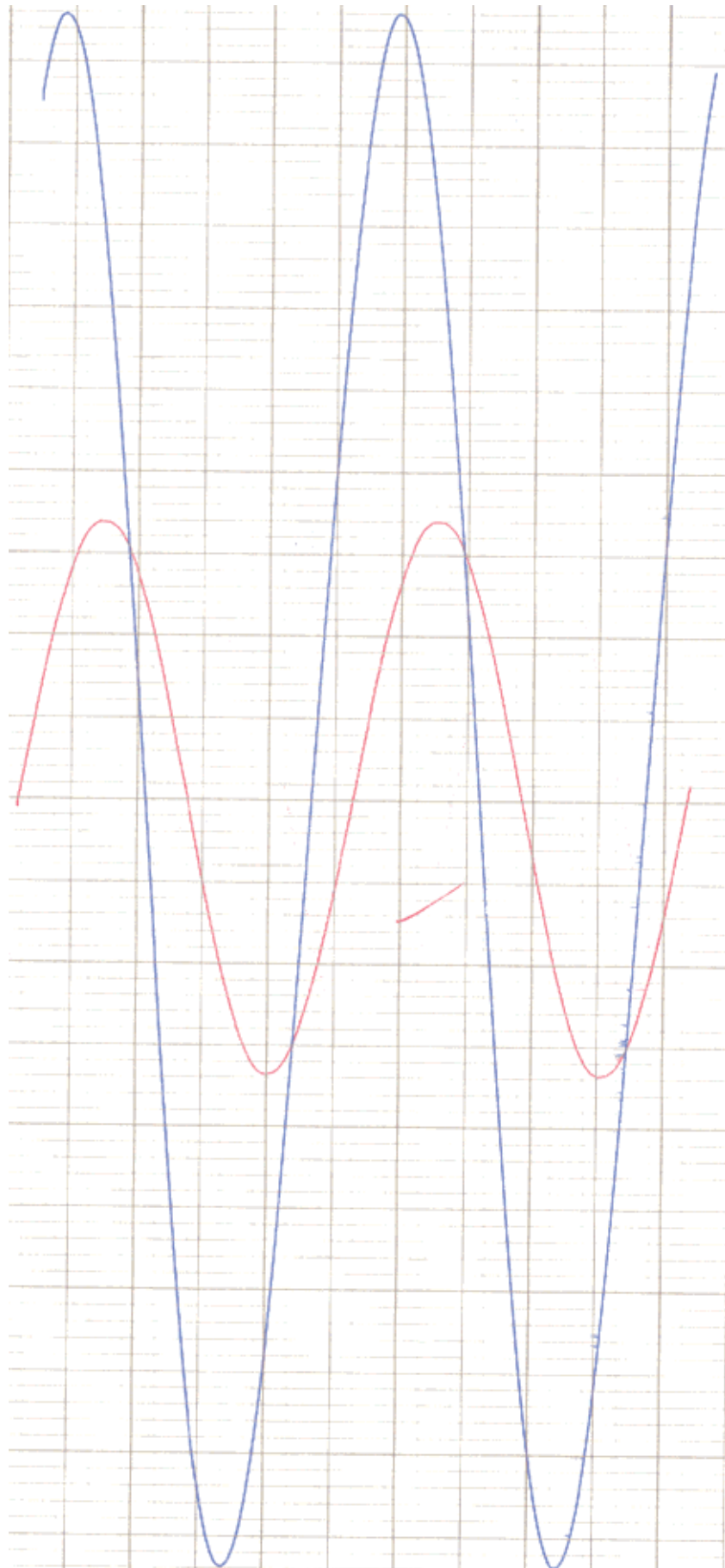
V 3.2, Baustein 2, $f = 0,02 \text{ Hz}$



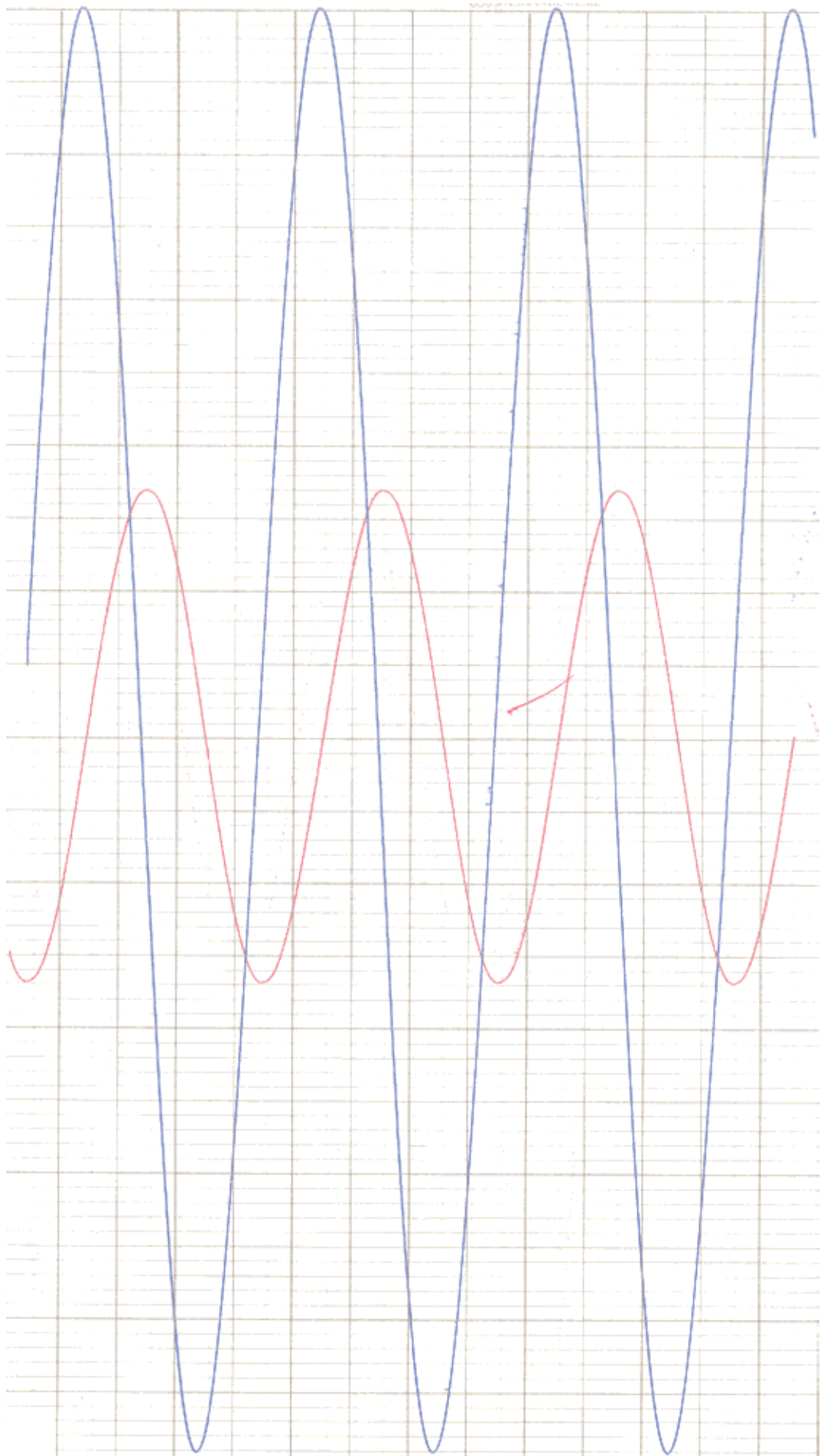
V 3.2, Baustein 2, $f = 0,03 \text{ Hz}$



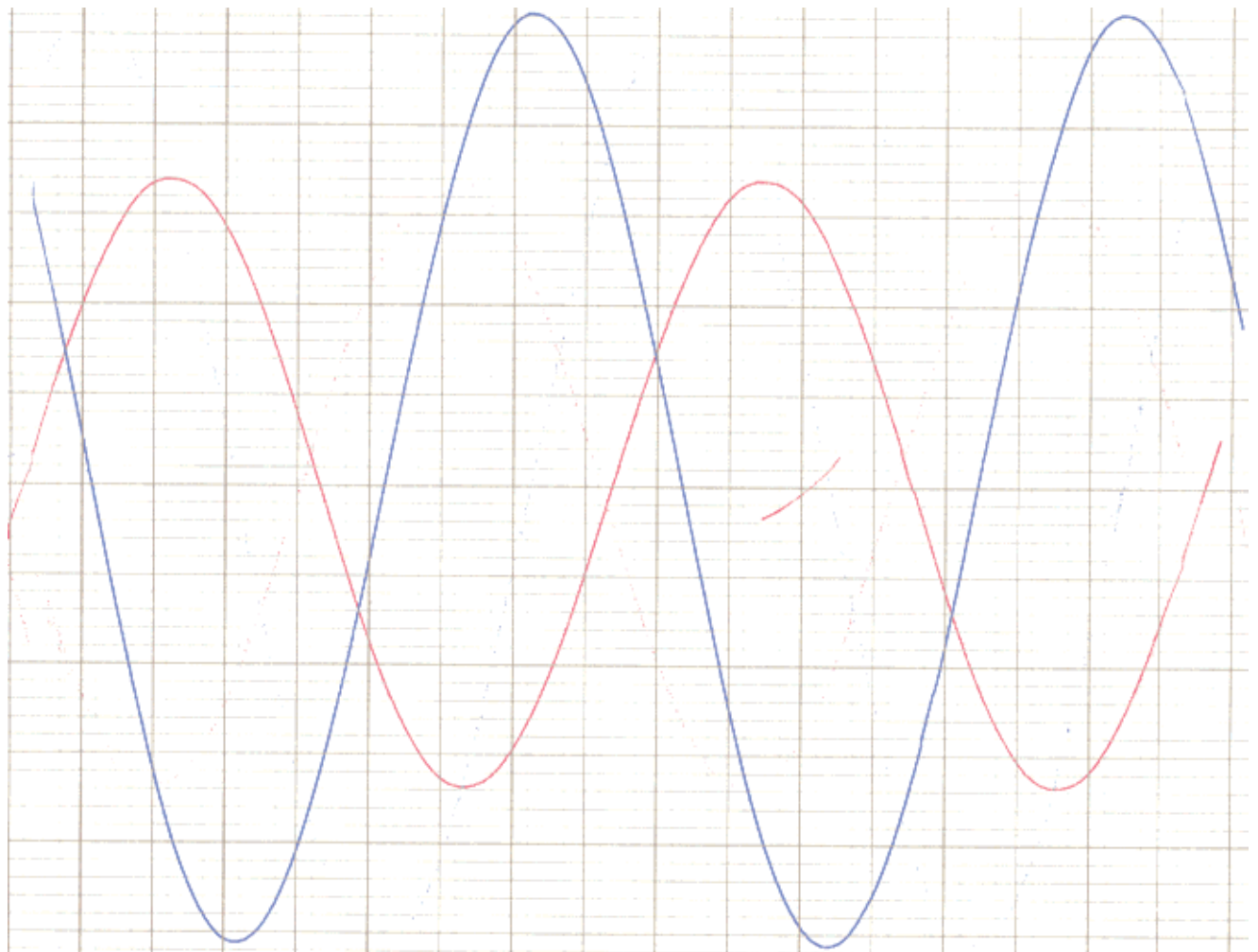
V 3.2, Baustein 2, $f = 0,05 \text{ Hz}$



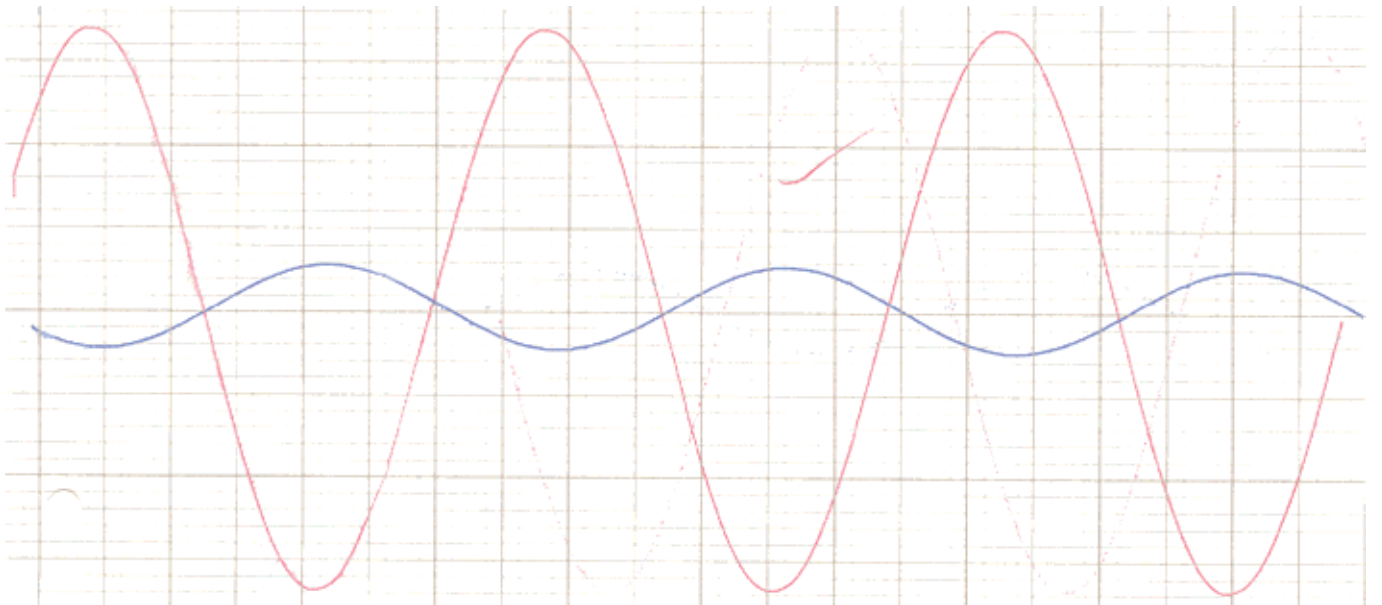
V 3.2, Baustein 2, $f = 0,1 \text{ Hz}$



V 3.2, Baustein 2, $f = 0,2 \text{ Hz}$



V 3.2, Baustein 2, $f = 0,5 \text{ Hz}$



Diskussion zu V3.2

Die Amplitudenverhältnisse beider Schaltungen sind in einem sehr schmalen Toleranzband. Das heißt, dass die errechneten Werte mit den gemessenen übereinstimmen. Geringe Abweichungen von einigen Prozent lassen sich durch eine Verknüpfung von Unsicherheiten erklären. So besitzt der Schreiber einen Innenwiderstand, der nicht unendlich hoch ist, sondern nur relativ groß ist im Vergleich zu den in den Schaltungen benutzten Widerständen. Eine weitere Abweichung von Rechnung zur Realität ist, dass der Schreiber die digitalen Signale nicht so genau auf das Papier bringen kann (z.B. Linienstärke). Die größte Unsicherheit dürfte jedoch beim Ablesen liegen. So ist die Bildung von $\frac{\partial a}{\partial \omega}$ und das Ablesen von φ_0 stark fehlerbehaftet.

Beim Ablesen des Phasenwinkels φ_0 ist uns ein Fehler passiert. Wir haben die ω -Achse in die falsche Richtung angenommen, so dass aus dem vorzeichen ein nachteilig und umgekehrt wurde. Vertauscht man in der Spalte Messergebnisse die - mit einem + und umgekehrt, wird man auch hier erkennen, dass die Abweichungen zwar relativ hoch sind, aber in die Tendenz die gleiche Message treffen. Für die Unsicherheiten beim Phasengang zählen die gleichen Größen wie beim Amplitudenverhältnis. ✓ Einfluss-

In Schaltung 1 bewegt sich der Phasengang zwischen 0° und 90° . Der Frequenz- und Phasengang erhält man deutlich ein DT_1 -Glied.

In Schaltung 2 bewegt sich der Phasengang zwischen 90° und -90° . Am Anfang tritt die Ausgangsspannung u_a der Eingangsspannung u_e voraus.

Bei größeren Frequenzen ($f > \approx 0,037 \frac{1}{s}$) kehrt sich dieser Vorgang um, d.h. die Eingangsspannung tritt der Ausgangsspannung ~~vorher~~ voraus.

Das Amplitudenverhältnis steigt bis zur 1. Eckfrequenz mit 20dB pro Dekade, bleibt dann bis zur 2. Eckfrequenz konstant und fällt nach der 2. Eckfrequenz mit 20dB pro Dekade kontinuierlich ab.

