Fachhochschule Jena University of Applied Sciences Jena	**Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik** Laborpraktikum Analoge Schaltungstechnik Prof. Dr. Th. Reuter

Der Operationsverstärker
dynamisches Verhalten

Studiengang: KMT		Datum: 01.11.2011
Set: 5.09	Platz: 4	1,3
Teilnehmer: Michael Goldbach / Jürgen Döffinger		04.11.11

Zielstellung

- Ermittlung des Amplituden- und Phasenfrequenzganges des rückgekoppelten OV
- Bestimmung von Slew-Rate und Leistungsbandbreite

1. Begriffe und Formelzeichen

Amplituden-Frequenzgang, Phasen-Frequenzgang, Bodediagramm, Nyquist-Diagramm, offene Verstärkung, Bandbreite, Grenzfrequenz, Transitfrequenz, Schleifenverstärkung, aktiver Tiefpass, Verstärkungs-Bandbreite-Produkt, Slew-Rate, Leistungsbandbreite

f_g, f_T, f_{PB}, A_D, A ,SR

2. Versuchsvorbereitung

2.1. Wiederholen Sie die Vorlesung zu den o.g. Themen. Machen Sie sich mit den in Punkt 1. angegebenen Begriffen und Formelzeichen vertraut. Machen Sie sich die Formelzeichen und die Zusammenhänge zwischen den angegebenen Größen klar.

2.2. Entwerfen Sie für einen invertierenden Verstärker die qualitative Funktion |A|=f(f) (Amplituden-Frequenzgang) für drei unterschiedliche Verstärkungen. Markieren Sie in der Funktion die Grenzfrequenz und die Transitfrequenz.
Was versteht man unter dem 20 dB-Abfall und warum beträgt dieser genau 20 dB/Dekade?
Wie sind Grenzfrequenz und Transitfrequenz definiert?

2.3. Geben Sie den mathematischen Zusammenhang zwischen Transitfrequenz, der offenen Verstärkung und der Verstärkung bei Gegenkopplung an. Wie ist die Schleifenverstärkung definiert und wie wird sie berechnet?

2.4. Gegeben sei A_D mit 100 dB und eine Grenzfrequenz bei offener Verstärkung von 100 Hz. Berechnen Sie die Schleifenverstärkung g für die Verstärkungen A=(20 dB; 40 dB; 60 dB; 80 dB) und die Grenzfrequenz bei diesen Verstärkungen. Stellen Sie die Abhängigkeiten der Schleifenverstärkung und der Grenzfrequenz von der Verstärkung grafisch dar.

2.5. Geben Sie den qualitativen Verlauf der Funktion φ=f(f) des nichtinvertierenden Verstärkers an. Bei welcher Frequenz beträgt der Phasenwinkel -45°?

2.6. Stellen Sie dar, wie sich mit Hilfe des Oszilloskopes der Phasenwinkel zwischen zwei Spannungen ermitteln läßt. Bekannte Größen sind die Frequenz f in Hz und die Zeitdifferenz Δt in s. Stellen Sie eine Gleichung zur Berechnung des Phasenwinkels auf.

2.7. Skizzieren Sie die Zeitfunktion der Eingangs- und Ausgangsspannung für den invertierenden und den nichtinvertierenden Verstärker. Wie groß ist in beiden Schaltungen die Phasenverschiebung zwischen U_e und U_a?

2.8. Erklären Sie die Größe Slew-Rate. Wie kann diese Größe ermittelt und berechnet werden? Definieren Sie den Begriff 'Leistungsbandbreite'. Leiten Sie die Gleichung zur Berechnung dieser Größe her. Von einem OV sind die Slew-Rate mit 0,66 V/µs und die Ausgangssättigungsspannungen mit ±10 V bekannt. Wie groß ist die Leistungsbandbreite? Welche Konsequenz hätte ein Überschreiten der Frequenz?

2.9. Bereiten Sie auf Papier mit einfachlogarithmischer Teilung zwei Diagramme zur Darstellung der Meßwerte vor. Es empfiehlt sich folgende Einteilung *:

zu Punkt 3.3.:	A:	$-10\ \text{dB} \leq A \leq 50\ \text{dB}$
	f:	$100\ \text{Hz} \leq f \leq 1\ \text{MHz}$
zu Punkt 3.4.:	φ:	$-150\,° \leq \varphi \leq 0\,°$
	f:	$100\ \text{Hz} \leq f \leq 1\ \text{MHz}$

(* oder handelsübliches Papier mit mindestens der angegebenen Anzahl von Dekaden)

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

3.1. Slew-Rate

Bauen Sie die Schaltung eines invertierenden Verstärkers nach Bild 1 mit R2=100 kΩ und f=1 kHz auf.

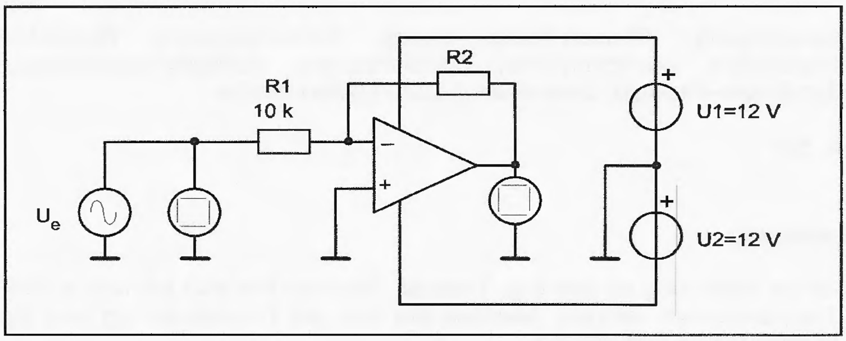


Bild 1: Meßschaltung zum dynamischen Verhalten von Operationsverstärkern

Stellen Sie die Amplitude einer sinusförmigen Eingangsspannung so ein, daß die Ausgangsspannung des OV gerade nicht begrenzt wird. Schalten Sie den Funktionsgenerator auf symmetrische Rechteckspannung um. Stellen Sie im Digitalbetrieb des Oszilloskops die Zeitablenkung so ein, daß Sie einen einzelnen Anstieg oder Abfall der Ausgangsspannung des OV über möglichst den gesamten Bildschirm abbilden. Plotten Sie diese Darstellung.

Ermitteln Sie aus der geplotteten Darstellung die Amplitude und die Anstiegszeit und berechnen Sie daraus die Slew-Rate und die Leistungsbandbreite.

Bestimmen Sie die Slew-Rate bei f=10 kHz. Vergleichen Sie den Wert mit dem für f=1 kHz ermittelten Wert. Ziehen Sie Schlußfolgerungen aus den Meßwerten.

3.2. Leistungsbandbreite

Schalten Sie den Funktionsgenerator wieder auf sinusförmige Spannung um. Stellen Sie die Amplitude der Spannung bei f=1 kHz wieder so ein, daß die Ausgangsspannung des OV gerade nicht begrenzt wird. Erhöhen Sie die Frequenz, bis sich die Sinusform am Ausgang des OV zu verformen beginnt. Notieren Sie die Spannungs- und Frequenzwerte. Wiederholen Sie die Messung für U_a=10 V_{ss} und U_a=5 V_{ss}.

Berechnen Sie die Leistungsbandbreite für die drei Ausgangsspannungen aus der Slew Rate und vergleichen Sie die gemessenen und berechneten Werte miteinander.

Begründen Sie, weshalb bei weiterer Erhöhung der Frequenz aus der Sinusfunktion eine Dreieckfunktion mit abnehmender Amplitude wird!

3.3. Amplituden-Frequenzgang

Ermitteln Sie die Funktionen A_{dB}=f(f) im Bereich 100 Hz $\leq f \leq f_T$ für folgende Widerstandswerte von R2 und sinusförmige Eingangsspannungen U_e:

R2=20 kΩ	U_e=0,2 V_{ss}
R2=100 kΩ	U_e=0,2 V_{ss}
R2=1 MΩ	U_e=0,15 V_{ss}

Beachten Sie während der Messungen, daß der sinusförmige Verlauf der Ausgangsspannung erhalten bleibt. Verringern Sie erforderlichenfalls die Eingangsspannung. Verwenden Sie zur Messung die Cursorfunktion des Oszilloskopes.

Stellen Sie die ermittelten Funktionen in dem vorbereiteten Diagramm grafisch dar. Ermitteln Sie grafisch die Grenzfrequenzen für die einzelnen Verstärkungen und die Transitfrequenz.

Berechnen Sie mit dem Wert der offenen Verstärkung aus dem Versuch 'Eigenschaften und Grundschaltungen des OV' die Grenzfrequenz für die offene Verstärkung.

Berechnen Sie aus der ermittelten Transitfrequenz und der jeweiligen Verstärkung die einzelnen Grenzfrequenzen. Vergleichen Sie die berechneten mit den grafisch ermittelten Werten.

3.4. Phasen-Frequenzgang

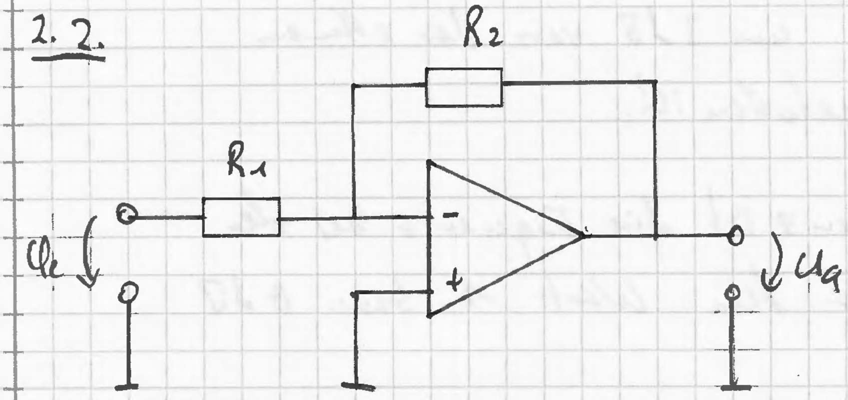
Ermitteln Sie für die gleiche Schaltung und die gleichen Widerstandskombinationen wie in Punkt 3.3. die Funktionen φ=f(f).

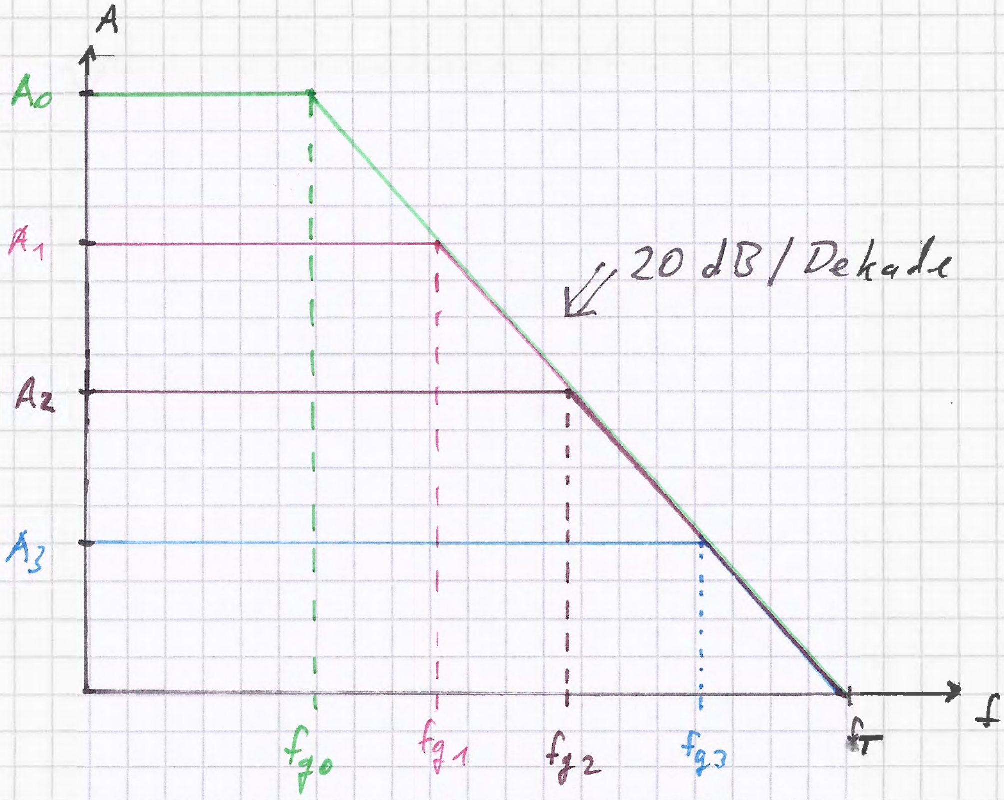
Hinweis: Üblicherweise wird der schaltungsbedingte Phasenwinkel von 180 ° nicht mit dargestellt. Kompensieren Sie diesen durch Invertierung von CH2 am Oszilloskop.

Stellen Sie die ermittelten Funktionen ebenfalls grafisch dar. Ermitteln Sie wiederum die Grenzfrequenzen für die einzelnen Verstärkungen. Vergleichen Sie die Werte mit den in Punkt 3.3. ermittelten. Bestimmen Sie den Phasenwinkel für die Transitfrequenz.

Ergänzen Sie das Datenblatt des Operationsverstärkers µA 741 aus dem Versuch 'Eigenschaften und Grundschaltungen des OV' mit den in diesem Versuch ermittelten Kennwerten.

2. 2.





Unter der 20 dB-Abfall versteht man das absinken der Verstärkung um 20 dB der Verstärkung von Dekade zu Dekade auf der Frequenzachse.

Der Abfall beträgt 20 dB pro Dekade aufgrund des Tiefpassverhaltens 1. Ordnung des OPV.

Die Grenzfrequenz ist die Frequenz bei der die Verstärkung um 3 dB von der offenen Verstärkung abgefallen ist.

Die Transitfrequenz ist die Frequenz bei der die Verstärkung den Wert 1 bzw. 0 dB einnimmt.

2.3.

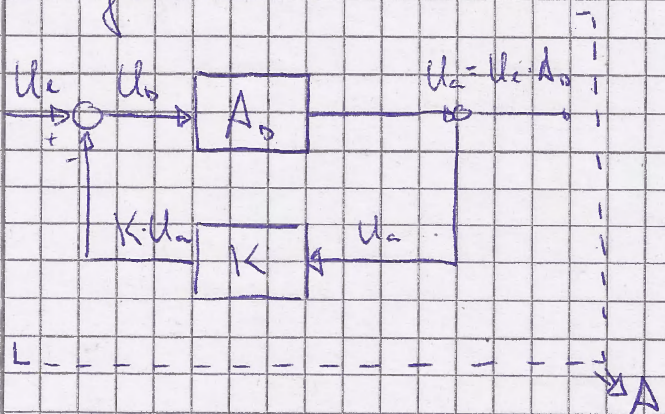
Für den frequenzkorrigierten OPV gilt

$$\underbrace{f_T}_{\text{Transitfrequenz}} = \underbrace{A_{D0} \cdot f_{g0}}_{\text{offene Verstärkung}} = \underbrace{|A_1| \cdot f_{g1} = |A_2| \cdot f_{g2} = |A_x| \cdot f_{gx}}_{\text{gegengekoppelte Verstärkung}}$$

Wird A_D kleiner so wird f_g größer da Produkt gleich bleibt.

$$A_D(f) = \frac{A_{D0}}{\left(1+j\frac{f}{f_{g1}}\right)\left(1+j\frac{f}{f_{g2}}\right)\cdots} \rightarrow f_T = A_D(f) \cdot f_g$$ gilt für unkorrigierten OPV

Die Schleifenverstärkung gibt an um welchen Faktor ein Signal verstärkt wird, welches einer Rückkopplung ausgesetzt wird.

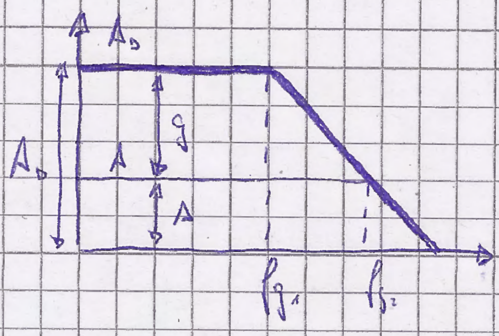


$$U_D = U_e - K U_a$$
$$U_a = (U_e - K U_a) A_D$$
$$U_a = U_e A_D - K U_a A_D$$
$$U_a (1 + K A_D) = U_e A_D$$
$$A = \frac{U_a}{U_e} = \frac{A_D}{1 + K A_D} = \frac{A_D}{1+g}$$

$K \cdot A_D = g$ = Schleifenverstärkung
(open) loop gain

für den Fall $K A_D \gg 1 \rightarrow A \approx \frac{1}{K}$

$$g = \frac{A_D}{A} \rightarrow \lg g = \lg A_D - \lg A$$



für invertierenden Verstärker: $A = -\frac{R_2}{R_1} = 1 - \frac{1}{K}$

$$K^{-1} = \frac{R_2}{R_1} + 1 = \frac{R_2 + R_1}{R_1} \rightarrow K = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

2.4.

geg.:

$A_{D_0} = 100\,dB$

$f_{g_0} = 100\,Hz$

ges.:

g, f_g bei $A = 20\,dB, 40\,dB, 60\,dB, 80\,dB$

Lösung:

$$f_{g0} = \frac{f_T}{A_{D_0}} \rightsquigarrow f_g = \frac{f_T}{A_D} \rightsquigarrow f_T = f_g \cdot A_D$$

$$f_T = f_{g0} \cdot A_{D_0} = 10000\,Hz = 10\,kHz$$

$$g = \frac{A_{D_0}}{A_D} - 1$$

A_D/dB	g	f/Hz
20	4	500
40	1,5	250
60	$0,\overline{6}$	$166,\overline{6}$
80	0,25	125
100	0	100

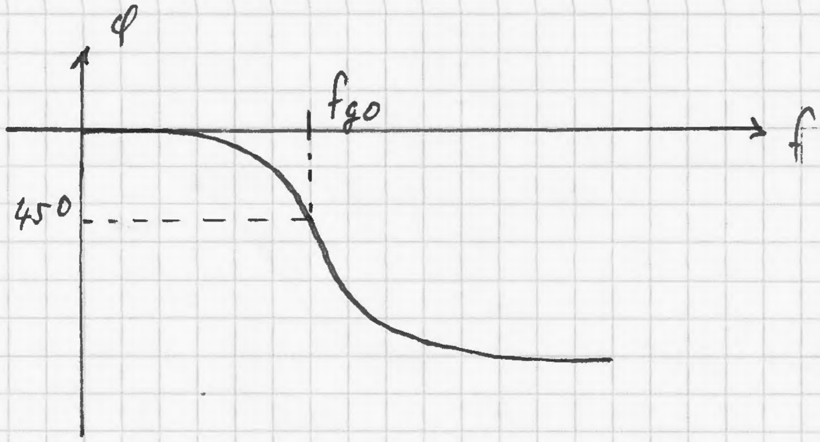
dB-Angaben erst in reale Verstärkungen umrechnen!

$A_D = 100\,dB \rightsquigarrow$

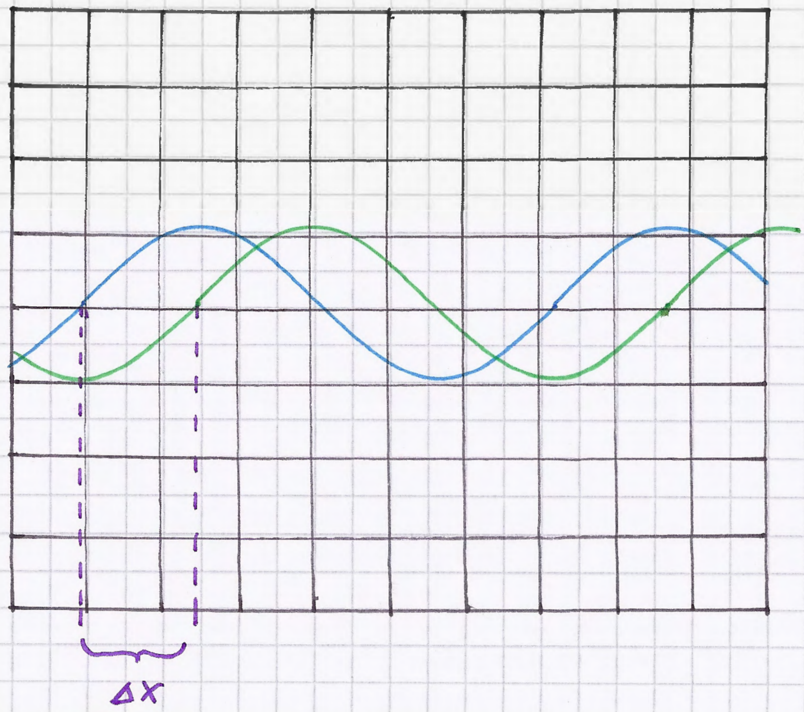
$A_D = 10^{\frac{100\,dB}{20}} = 10^5$

grafische Darstellung?

2.5.



2.6.



z. B.:
$x = 10\,ms\,/DIV$

$\Delta t = \Delta x \cdot x$

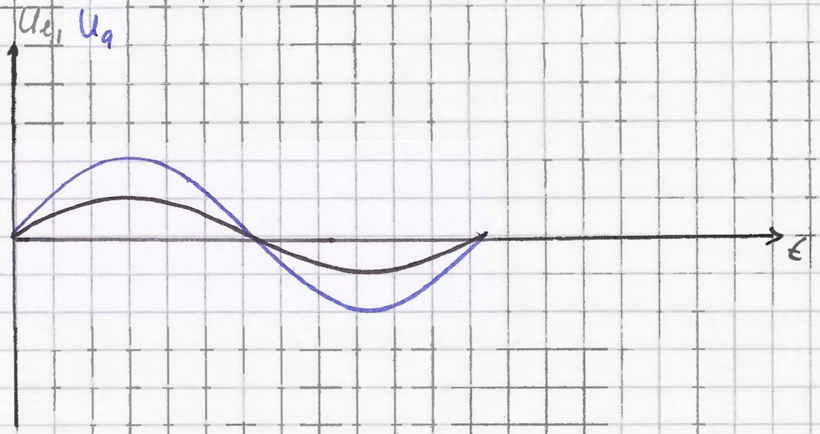
$$\frac{360°}{T} = \frac{\varphi}{\Delta t} \rightsquigarrow \varphi = \frac{360° \cdot \Delta t}{T} \quad \Big| \; T = \frac{1}{f}$$

$\varphi = 360° \cdot \Delta t \cdot f \qquad | \; \Delta t = \Delta x \cdot x$

$$\underline{\underline{\varphi = 360° \cdot \Delta x \cdot x \cdot f}}$$

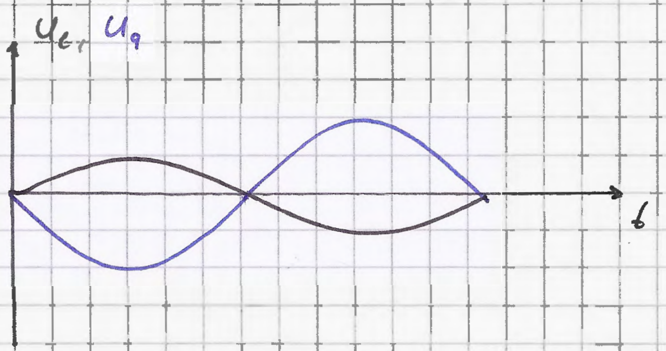
2.7.

nicht invertierender Verstärker



$\varphi = 0°$

invertierender Verstärker



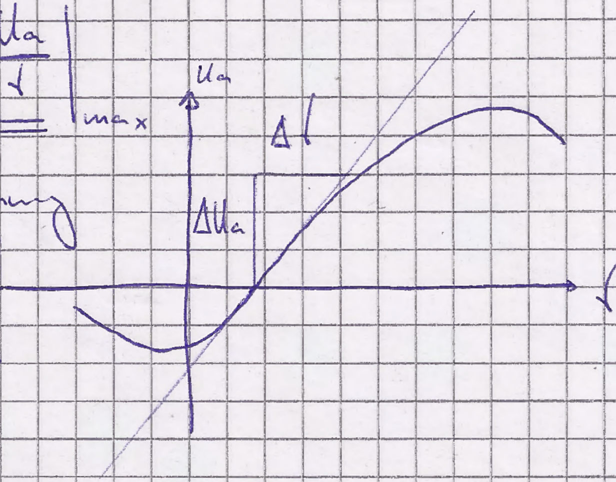
$\varphi = 180°$

2.8.

Die Slew Rate ist die maximale Ausgangsspannungsanstiegsgeschwindigkeit.

$$SR = \frac{\Delta U_a}{\Delta t}\Big|_{max}$$

Möglichkeit der Bestimmung aus Spannungs-Zeit-Fkt und Berechnungsformel.



Leistungsbandbreite ist die Frequenz bis zu welcher ein Signal (für ein vorher def. Ausgangsamplitude) noch verzerrungsfrei verarbeitet werden kann.

Für ein Sinus-Signal gilt:

$$u_a(t) = \hat{U}_a \cdot \sin(2\pi f t)$$

$$\frac{du_a}{dt} = \frac{d[\hat{U}_a \cdot \sin(2\pi f t)]}{dt}$$

größter Anstieg bei/nach Nulldurchgang (also bei $= 0$, $\frac{1}{f}$ usw)

$$SR = \hat{U}_a\, 2\pi f \cdot \underbrace{\cos(2\pi f \tfrac{1}{f})}_{=1}$$

$$SR = \hat{U}_a \cdot 2\pi f \quad \rightarrow SR_{sin} = \hat{U}_a \cdot 2\pi f_{sin}$$

mit $f_{sin} = f_{PB}(\hat{U}_a) \rightarrow SR_{sin} = \hat{U}_a \cdot 2\pi f_{PB}(\hat{U}_a)$

$$f_{PB}(\hat{U}_a) = \frac{SR_{sin}}{\hat{U}_a \cdot 2\pi}$$

✓

Bsp: $SR = 0{,}66 \frac{V}{\mu s}$ $\quad \hat{U}_a = 10V$

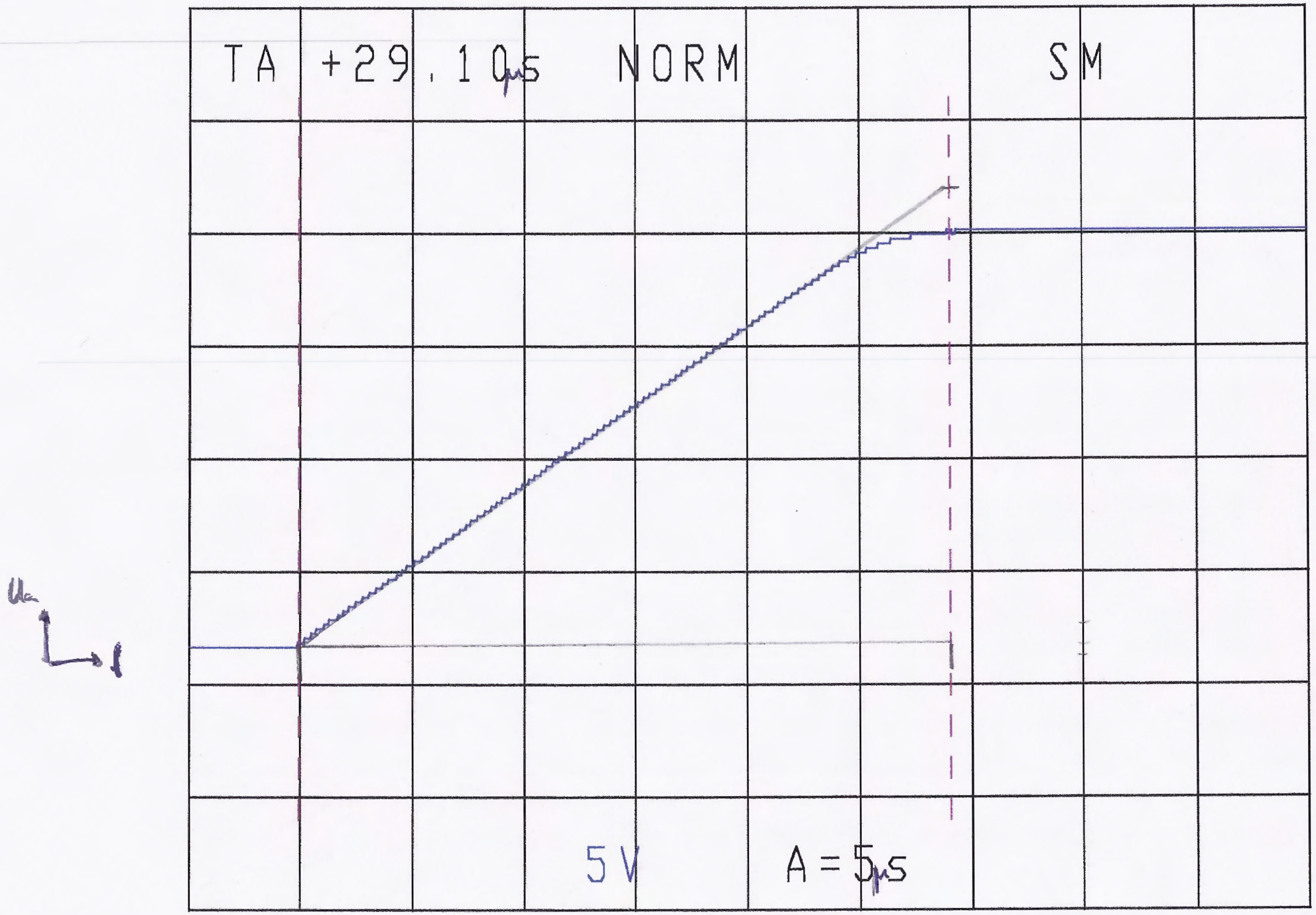
$$f_{PB} = \frac{0{,}66 \frac{V}{\mu s}}{10V \cdot 2\pi} = 0{,}01 \frac{1}{\mu s}$$

Ein Überschreiten der Leistungsbandbreite hätte eine Verzerrung zur Folge.

z.B. Abschneiden einer Sinus Fkt → Verformung bis zu Dreiecksspannung.

3.1.

1 kHz



01.11.05 platz4.plt

für 1 kHz

$\Rightarrow$ $\Delta U_a = 20\,V$

$\Delta t = 29{,}1\,\mu s$

$$SR = \frac{\Delta U_a}{\Delta t}\bigg|_{max} = 0{,}687 \frac{V}{\mu s}$$

$$f_{PB} = \frac{SR}{\hat{U}_a \cdot 2\pi} = \frac{0{,}687 \frac{V}{\mu s}}{\frac{18}{2}V \cdot 2\pi}$$

$$\cancel{f_{PB} = 0{,}006 \frac{1}{\mu s} = 6{,}07 \frac{1}{\mu s}}$$

$$\cancel{f_{PB} = 0{,}006\,MHz}$$

$$f_{PB} = 0{,}0121 \frac{1}{\mu s}$$

$$f_{PB} = 0{,}0121\,MHz$$

für 10 kHz

$\Rightarrow$ $\Delta U_a = 17{,}8\,V$

$\Delta t = 27{,}35\,\mu s$

$$SR = \frac{\Delta U_a}{\Delta t}\bigg|_{max} = 0{,}651 \frac{V}{\mu s}$$

$$f_{PB} = \frac{0{,}651 \frac{V}{\mu s}}{\frac{18}{2}V \cdot 2 \cdot \pi} = 0{,}0115 \frac{1}{\mu s} = f_{PB}$$

Diskussion:

Für beide Frequenzwerte sind jeweils Slew-Rate und Leistungsbandbreite annähernd gleich.
Die Slew-Rate ist Bandbreite-abhängig und bleibt innerhalb einer Messreihe mit eben dieser Bandbreite annähernd unverändert. Es zeigt sich eine annähernde Frequenzunabhängigkeit

3.2.

$$SR = 0{,}687 \frac{V}{\mu s}$$

$$f_{PB} = \frac{SR}{\hat{U}_a \cdot 2\pi}$$

$$f_{PB}(\hat{U}_a = 8{,}85) = \frac{0{,}687 \frac{V}{\mu s}}{8{,}85V \cdot 2\pi} = 0{,}012 \frac{1}{\mu s} \quad \text{bei} \quad 12{,}4\,kHz$$

#

$$f_{PB}(\hat{U}_a = 5V) = \frac{0{,}687 \frac{V}{\mu s}}{5V \cdot 2\pi} = 0{,}022 \frac{1}{\mu s} \quad \text{bei} \quad 20\,kHz$$

#

$$f_{PB}(\hat{U}_a = 2{,}5V) = \frac{0{,}687 \frac{V}{\mu s}}{2{,}5V \cdot 2\pi} = 0{,}043 \frac{1}{\mu s} \quad \text{bei} \quad 32{,}5\,kHz$$

$$f_{PB}\ (\hat{U}_a = 2{,}5V) > f_{PB}\ (\hat{U}_a = 5V) > f_{PB}\ (\hat{U}_a = 8{,}85V)$$

Bei Erhöhung der Frequenz steigt die Spannung schneller auf den maximalen Wert an. Der OPV kann dieser nicht schnell genug folgen aufgrund der vorgegebenen Slew Rate. Somit wird der Sinus begrenzt, was zur Dreiecksform des Ausgangssignals führt. Dieses Abschneiden ist auf die (gewollten und ungewollten) Kapazitäten Anteile zurückzuführen. Diese lassen keine unendliche, also nur eine begrenzte Flankensteilheit zu.

3.3.

$$f_{g0} = \frac{f_T}{A_{D0}} = \frac{0{,}71\ MHz}{792000} = 0{,}9\ Hz$$

$$\underline{\underline{f_{g0} = 0{,}9\ Hz}}$$

$$f_T = f_g \cdot A_{D0}$$

a) $R = 20\,k\Omega$

$f_T = 0{,}67\ MHz$ $\qquad f_g = \frac{f_T}{A_{D0}}$

$A_D = 2$

$\cancel{f_g = 1{,}34\ M}$ $\qquad \underline{\underline{f_g = 335\ kHz}}$ $\qquad \underline{\underline{f_{g\,graf} = 280\ kHz}}$

b) $R = 100\,k\Omega$ $\qquad f_T = 0{,}72\ MHz$

$\underline{\underline{f_g = 72\ kHz}}$ $\qquad \underline{\underline{f_{g\,graf} = 75\ kHz}}$

c) $R = 1\,M\Omega$ $\qquad f_T = 0{,}75\ MHz$

$\underline{\underline{f_g = 7{,}5\ kHz}}$ $\qquad \underline{\underline{f_{g\,graf} = 10\ kHz}}$

Im Vergleich der gemessenen und der errechneten Werte stellt man bei 20kΩ und 100kΩ annähernde Übereinstimmung fest. Beim 1MΩ Widerstand lässt sich eine größere Abweichung feststellen.