

Entwicklung eines  
Ablenkverstärkers für  
die Digiset-  
Bildröhrensteuerung

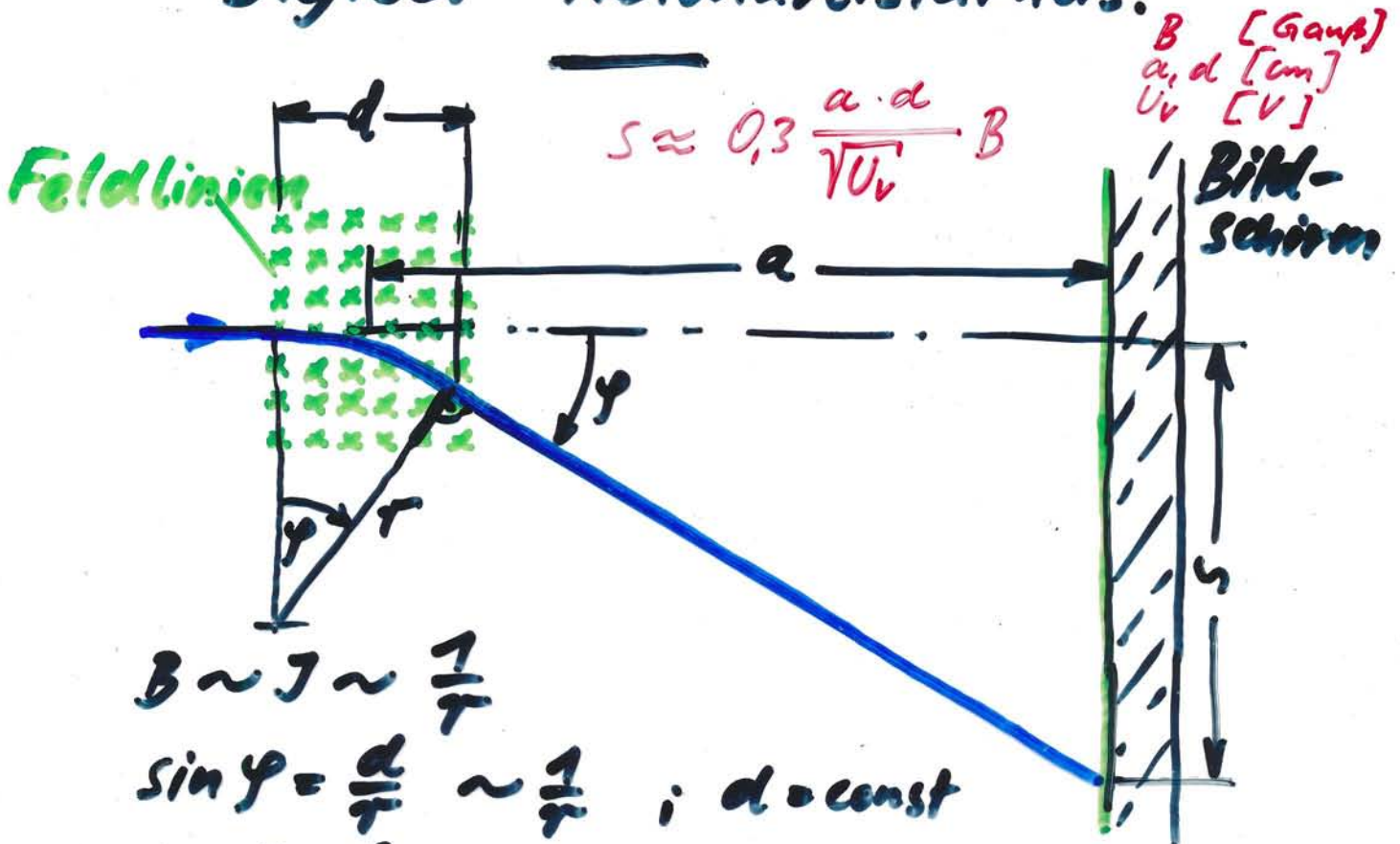
1969

Heinrich Jürgensen

© Heinrich Jürgensen

25 Blatt *gr* 15.9.2021

# Praktische Anwendung der Regelungstechnik, dargestellt am Beispiel des Digiset-Ablenkverstärkers.



$B \sim I \sim \frac{1}{r}$

$\sin \gamma = \frac{d}{r} \sim \frac{1}{r} ; d = \text{const}$

$\tan \gamma = \frac{s}{a} \sim s ; a = \text{const}$

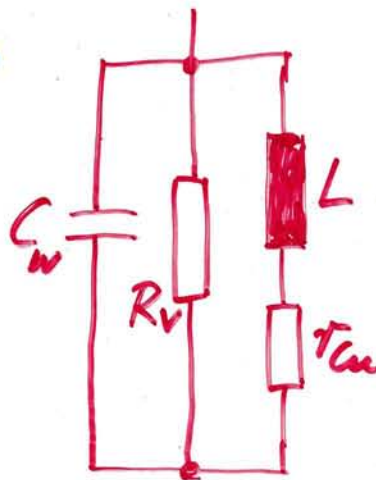
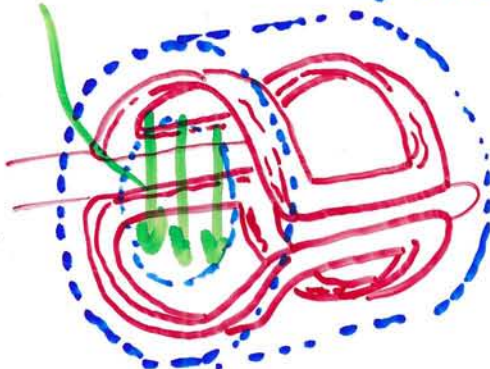
$\sin \gamma \sim I ; \text{für kleine } \gamma : \gamma \sim I$

Kissen-  
verzerrung.

## Elektronenstrahl im magnet. Feld

### Ablenkfeld

Blockpaket



$L =$  Induktivität  
z.B. 60  $\mu\text{H}$

$T_{Cu} =$  Kupferwiderstand  
z.B. 0,45  $\Omega$

$C_w =$  Wicklungskapazität  
z.B. 75 pF

$R_v =$  Verlustwiderstand

Teil einer Wicklung  
aus einer Ablenkeinheit

Ersatzbild  
Ablenkspule



Vorgaben:  $J = \pm 5 A$

Einschwingzeiten  $\left\{ \begin{array}{l} \Delta T \leq 35 \mu s \text{ f\u00fcr } \Delta J = 10 A \\ t_k \leq 1 \mu s \text{ f\u00fcr } \Delta J < 100 mA \end{array} \right.$

Genauigkeit: 1 Bildlinie  $\hat{=} 30 \mu m$  (1mA)  
 max Auslenkung  $\hat{=} 300 mm$  (10A)  
 Fehler m\u00f6glichst  $< 10^{-4}$ !

Infolge dieser hohen Genauigkeitsforderung kommt nur ein System mit R\u00fcck-(Gegen-)kopplung in Frage;  
 Schleifenverst\u00e4rkung  $> 1000$ !  
 gegengekoppelt. Verst\u00e4rk.

Induktionsgesetz:

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

$$u = L \frac{di}{dt}$$



$$i = \hat{i} \cdot \sin \omega t$$

$$\frac{di}{dt} = \hat{i} \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

$$u = \omega L \hat{i} \cdot \cos \omega t$$

$$U = \omega L J \text{ Effektivwert}$$

Beispiel 1:  $L = 60 \mu H$ ;  $f_k = 1 MHz$ ,  $\hat{i} = 50 mA$

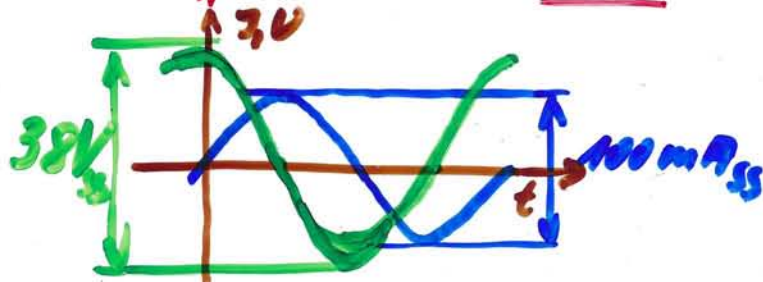
$$\hat{u} = \omega_k L \hat{i}$$

Spitzenwert!

$$= 2\pi \cdot 10^6 \frac{1}{s} \cdot 60 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{A} \cdot 0,05 A = \underline{19Vs}$$

Kleinsignalbereich

$$t_k = const$$

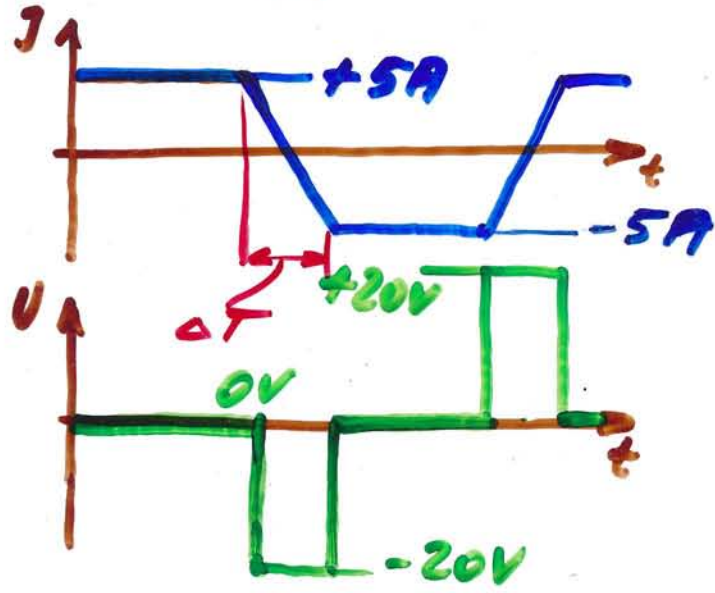


Beispiel 2

Annahme, daß der treibende Verstärker nur max ± 20V bei ± 5A liefern kann. Totzeiten durch Übersteuerung des Regelkreises (Sättigung d. Transistoren) vermeiden.

$L = 60 \mu H$ ,  $\Delta J = -10A$  (d.h. +5 → -5)  
 $\Delta T = 30 \mu s$

$U = L \frac{\Delta J}{\Delta T} = 60 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{A} \cdot \frac{-10A}{30 \cdot 10^{-6}s} = \underline{\underline{-20V}}$



$\Delta T = 3 \frac{\mu s}{A} \Delta J$

Großsignalbereich  $t_e = \Delta T + t_k$

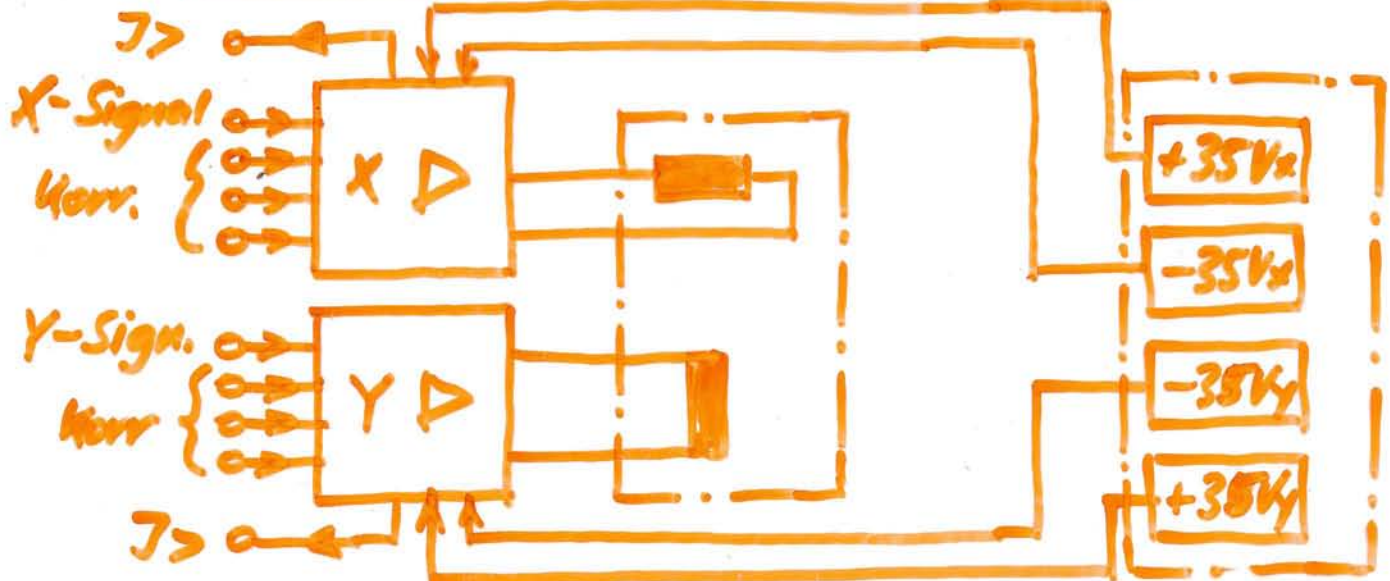
Alle im folgenden dargestellten regelungstechnischen Betrachtungen zum Einschwingverhalten und zur Stabilität des Regelkreises sowie alle Bodediagramme u. dergl. gelten nur für den Kleinsignalbereich !!

Bei Messungen beachten!

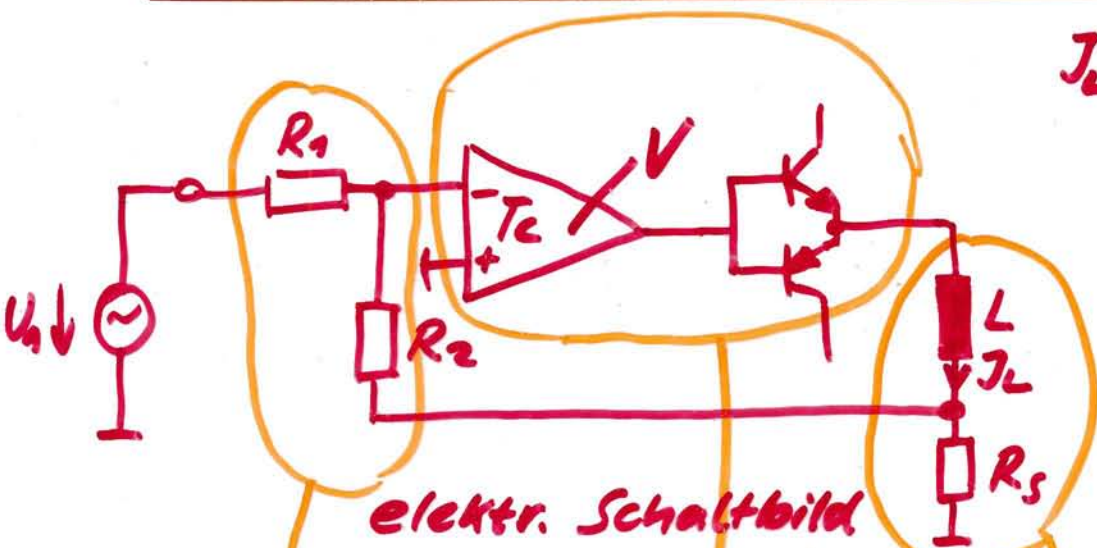
Der Regelverstärker muß in der Lage sein, in der Zeit  $t_r \ll t_k$  vom Großsignalbereich in den Kleinsignalbereich zurück zu kehren!



# Blockschaltbild (Funktion)



Verstärker Ablenkeinheit unger. Netzteil.



$$J_L = -U_n \frac{R_2}{R_1 R_s} = -U_n \frac{n}{R_s}$$

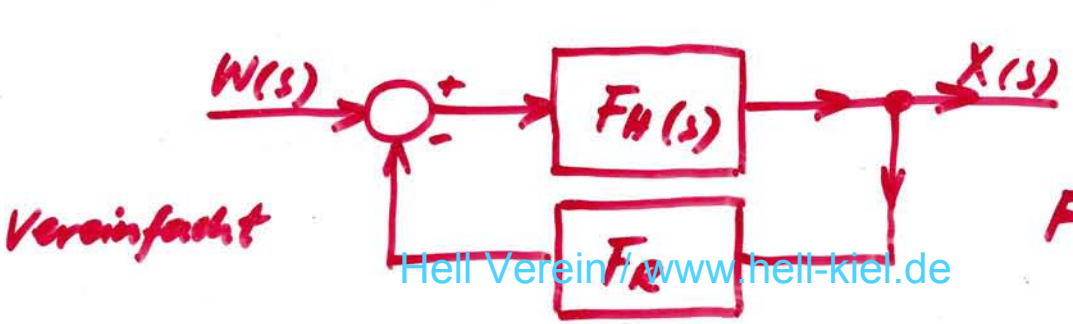
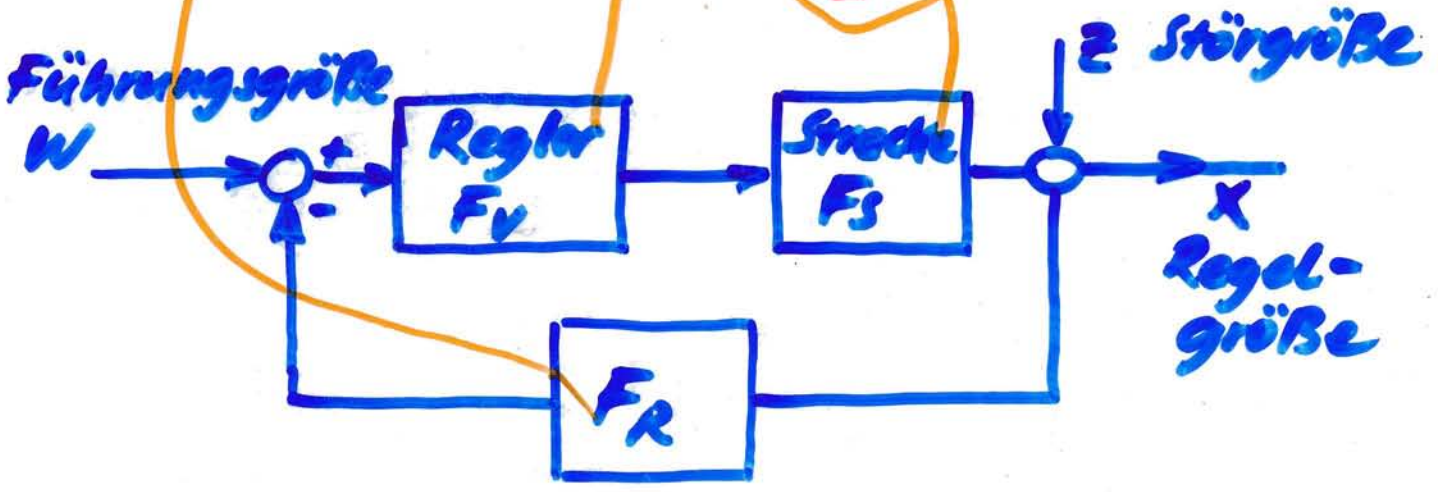
$$T_c = RC = \frac{1}{\omega_0}$$

$$T_L = \frac{L}{R_s}$$

$$R_2 \gg R_s$$

$$R_s \approx 0,5 \Omega$$

elektr. Schaltbild



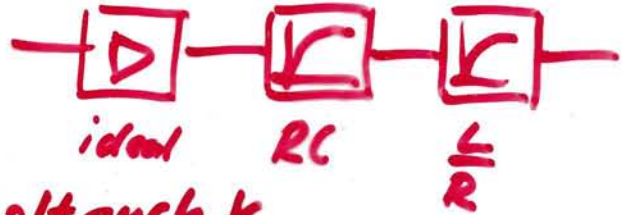
Vereinfacht

$$s = j\omega$$

$$F = \frac{F_H}{1 + F_H F_R}$$

Mathematische Untersuchung mit den Methoden der Regelungstechnik möglich (vereinfachtes System)

$$F_H = \frac{V}{(1+sT_E)(1+sT_L)}$$



$$F_R = \frac{R_1}{R_1+R_2} = \frac{1}{1+n} \quad \text{; oft auch } k \text{ oder } \beta$$

$$\frac{R_2}{R_1} = n \quad ; \quad \frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{n}{1+n}$$

Sollwert am Reglereingang:

$$W(s) = U_0(s) \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

Regelgröße:

$$X(s) = \frac{U_0(s) \cdot n \cdot V}{V + (1+n)(1+sT_E)(1+sT_L)}$$

Untersucht wird mit Hilfe d. Laplace-Transformation Antwort des Systems ( $X(s)$ ) auf einen Rechtecksprung am Eingang  
— gilt nur im Kleinsignalbereich! —

$$U_0(t) \quad 0 \text{ --- } \frac{U_0}{s}$$

$$X(s) = \frac{U_0}{s} \cdot F(s)$$

anschließend Rücktransformation zu  $X(t)$



$$X(s) = \frac{U_0 \cdot V \cdot n}{1+n+V} \cdot \frac{1}{s \left[ s^2 \frac{(1+n)T_c T_L}{1+n+V} + s \frac{(1+n)T_c + T_L}{1+n+V} + 1 \right]}$$

$$= \frac{U_0 \cdot V \cdot n}{1+n+V} \cdot \frac{1}{s(1 + 2 \xi s/\omega_n + s^2/\omega_n^2)}$$

$$\xi = \frac{1+m}{2\sqrt{m}} \sqrt{\frac{1+n}{1+n+V}}$$

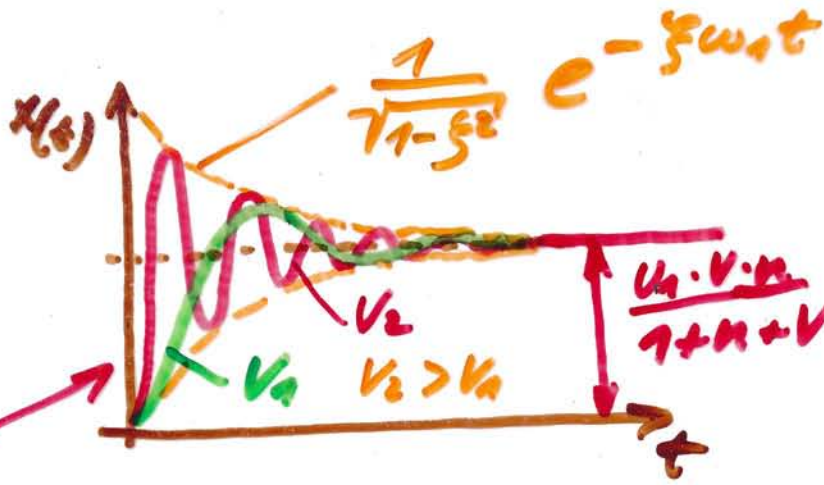
$$\omega_n = \sqrt{\frac{1+n+V}{(1+n)T_c T_L}}$$

$$m = \frac{T_L}{T_c}$$

Rücktransformation in den Zeitbereich  
(siehe Nixon: Tafeln 2. LP-Transf. 00.101):

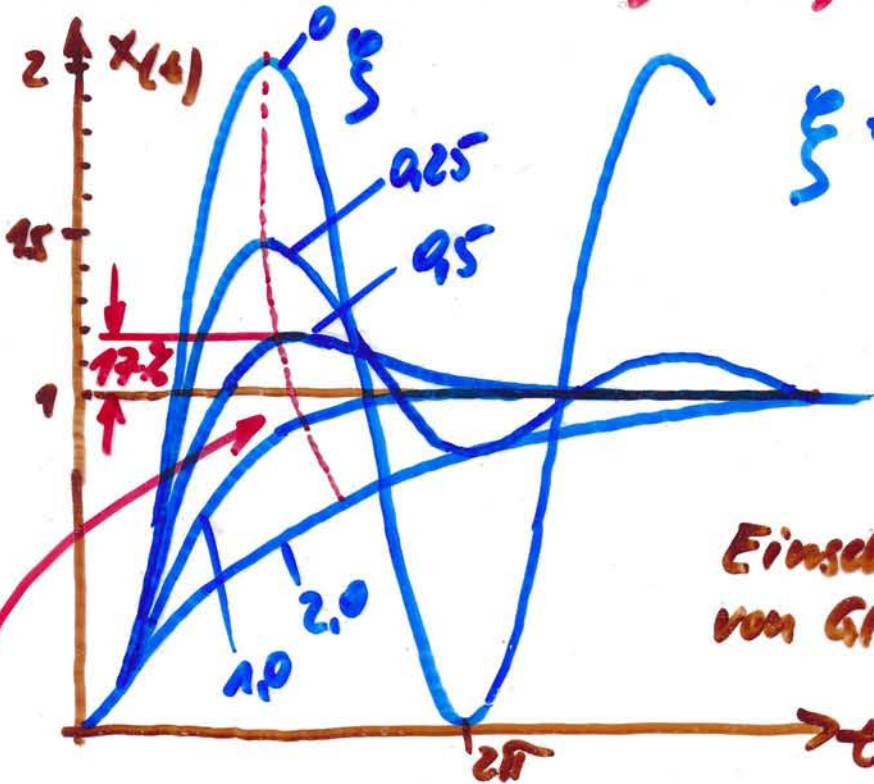
$$X(t) = \frac{U_0 \cdot V \cdot n}{1+n+V} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t - \varphi) \right]$$

$$\varphi = \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{-\xi}$$



; bei  $\eta = 1$ :  
 $U_1 \frac{V}{1+V}$

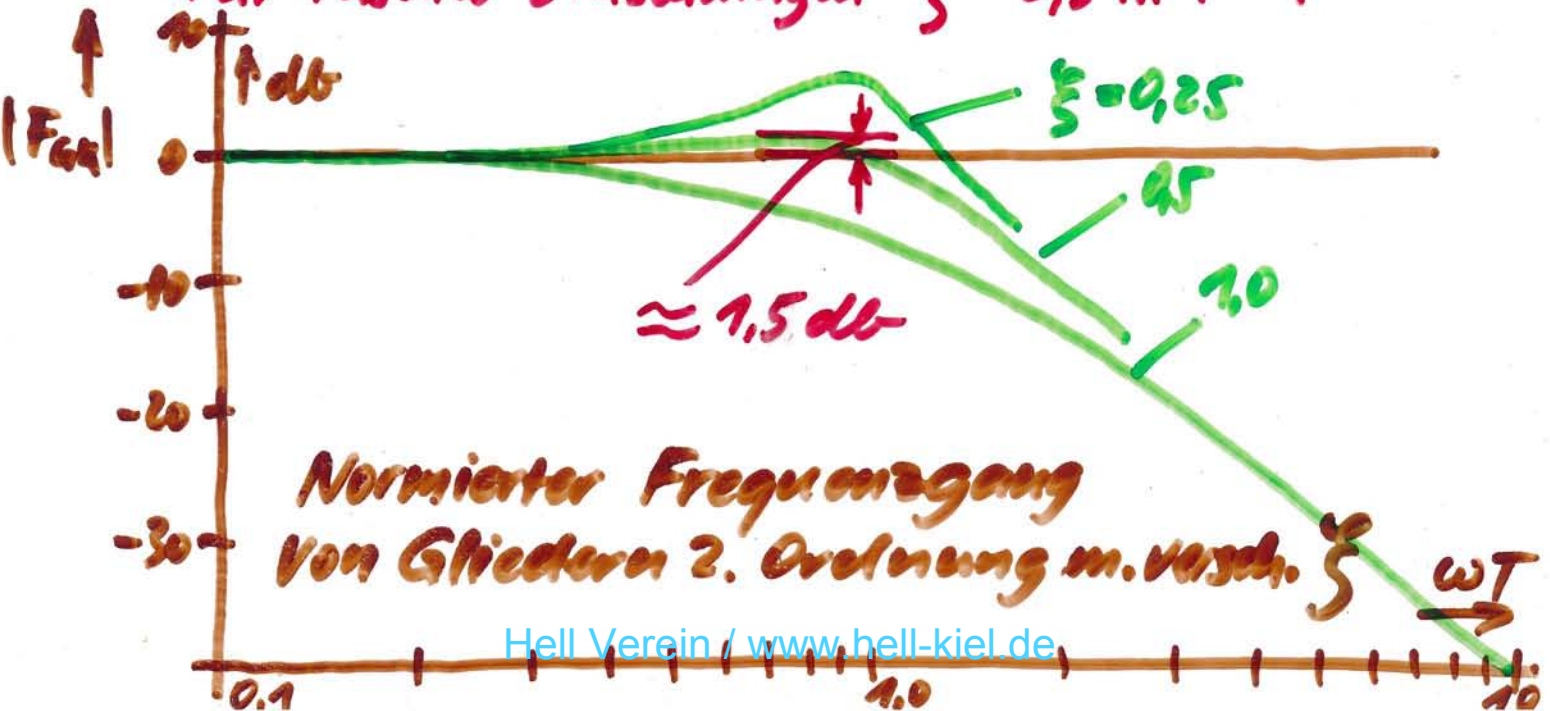
Für rasches Einschwingen  $V$  groß machen!



$\xi$  = Dämpfungsfaktor

Einschwingverhalten von Gliedern 2. Ordnung mit versch.  $\xi$

Für rasches Einschwingen  $\xi$  0,5...1 !





Untersuchung der Gleichung für  $\xi$   
ergibt:

$$\frac{V}{m} = 1 \rightarrow \xi = 0,5$$

$$\frac{V}{m} = 0,1 \rightarrow \xi = 5 \quad m = \frac{T_L}{T_C} = \frac{f_C}{f_L}$$

d.h. bei  $\left\{ \begin{array}{l} V = 1000, L = 60 \mu\text{H}, R_S = 0,5 \Omega \\ \xi = 0,5 \\ m < 1 \end{array} \right. \quad f_L = \frac{1}{2\pi T_C} = \underline{\underline{1,34 \text{ kHz}}}$

ist die Forderung an die Bandbreite  
des Verstärkers  $1000 \cdot 1,34 \text{ kHz} \rightarrow \underline{\underline{1,34 \text{ MHz}}}$

wird verständlich am Bodediagramm!

Untersuchung der Gleichung für  $\omega_1$   
ergibt:

$\omega_1$  wächst mit  $\sqrt{V}$  wenn  $T_L$  und  $T_C$   
konstant sind

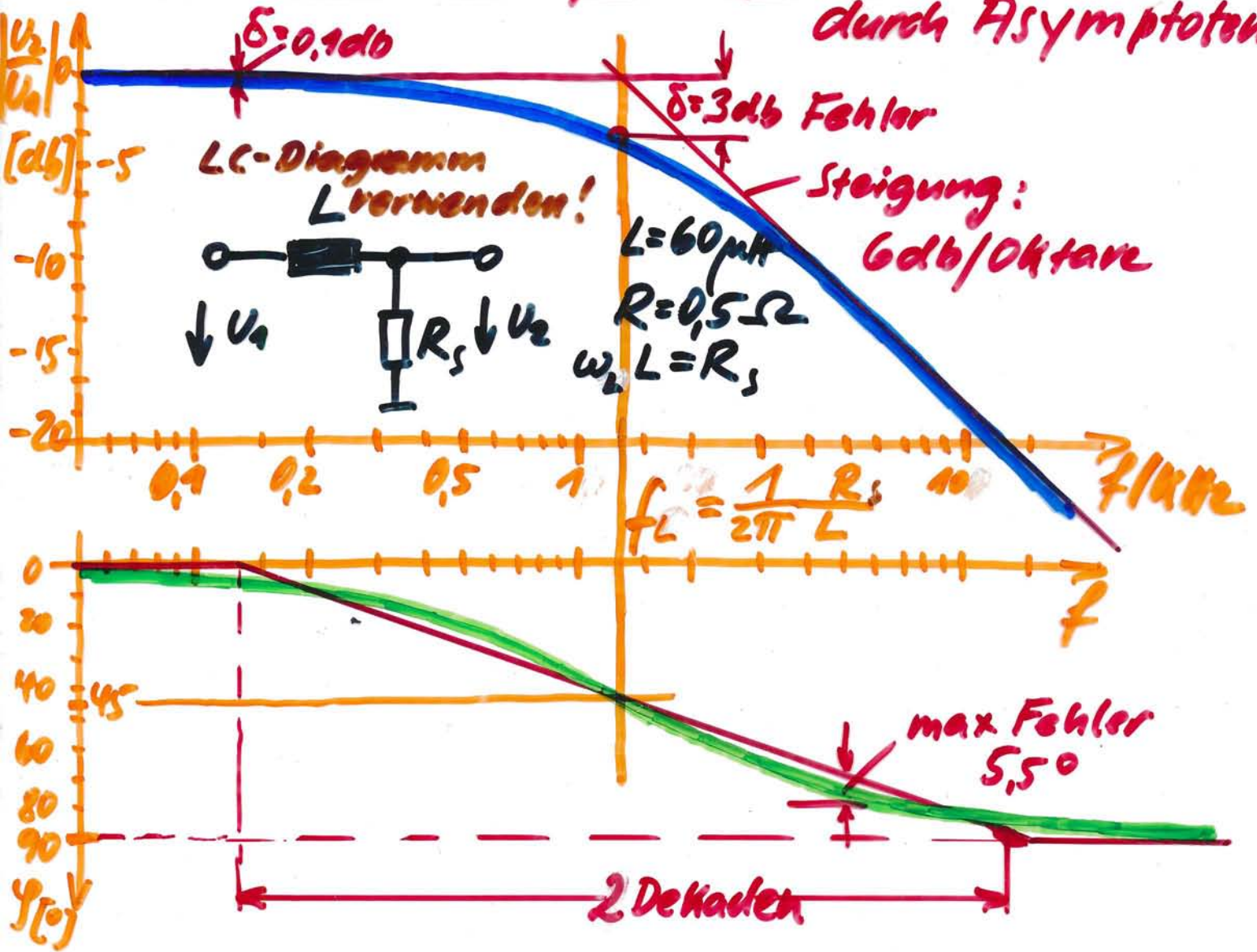
Da  $\xi$  ebenfalls durch  $V$  beeinflusst wird,  
bietet sich die Möglichkeit, die Ver-  
stärkung einstellbar zu machen, um  
das Einschwingverhalten zu

optimieren; z.B.  $V = 50 \dots \underline{\underline{60}} \dots 70$

Für  $V = 1000, L = 60 \mu\text{H}, R_S = 0,5 \Omega, \xi = 0,5, n = 1$   
wird  $\omega_1 = \underline{\underline{0,96 \text{ MHz}}}$  ( $\omega_1 = \underline{\underline{1,34 \text{ MHz}}}$  b.  $n = 0$ )



Bodediagramm für Tiefpaß; Näherung durch Asymptoten



$f/f_L$	0,1	0,25	0,4	0,5	1,0	2,0	2,5	4,0	10,0
$\delta_{[dB]}$	0,04	0,32	0,65	1,0	3,01	1,0	0,65	0,32	0,04

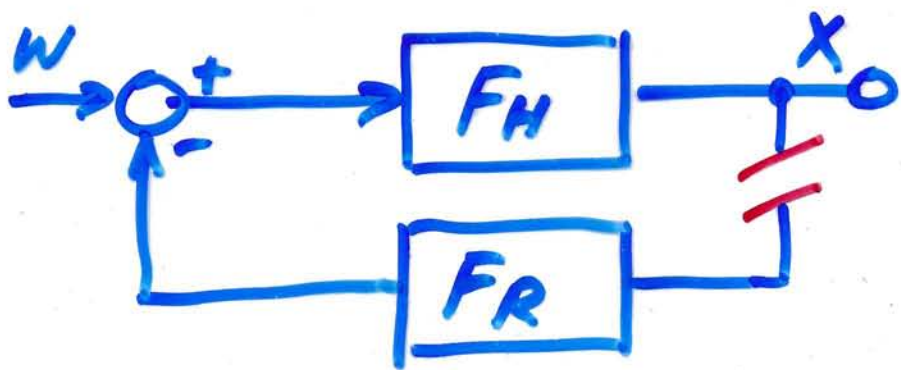
Korrekturtablelle f. Amplitudengang

Zur Konstruktion des exakten Phasenganges Nomogramme verwenden

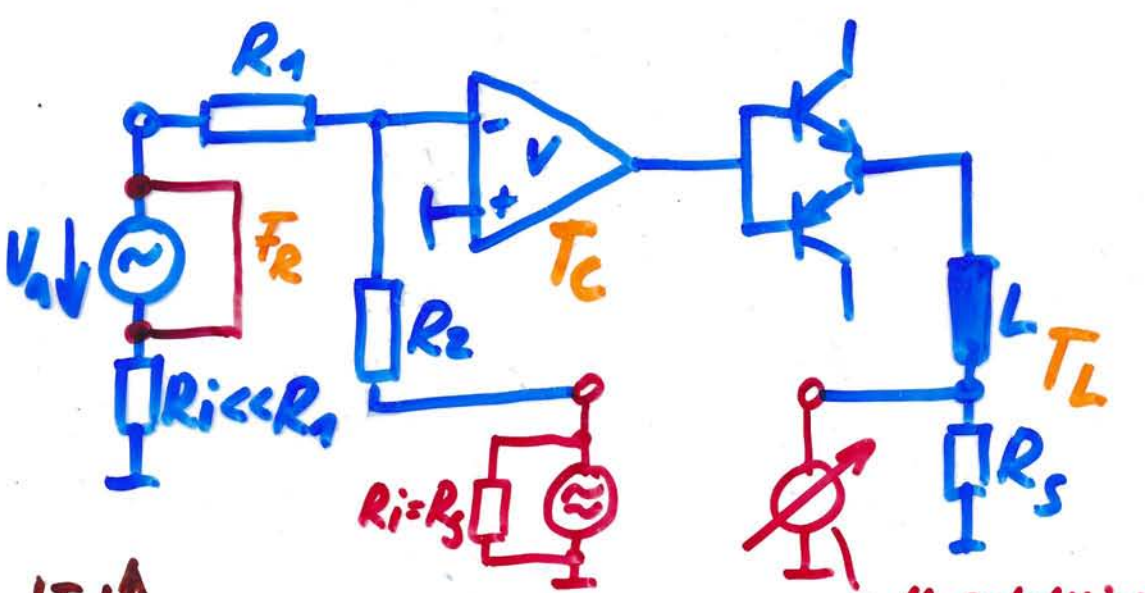
Verwendung von Schablonen üblich!



# Betrachtung des aufgeschnittenen (aufgetrennten) Regelkreises zur Darstellung und später zur Messung des Bode-Diagrammes



Trennung an jeder beliebigen Stelle möglich



$$F_R = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$T_C = RC$$

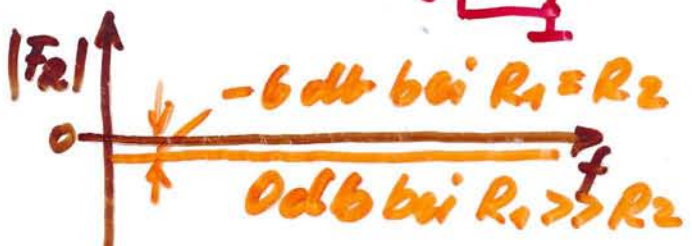
$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

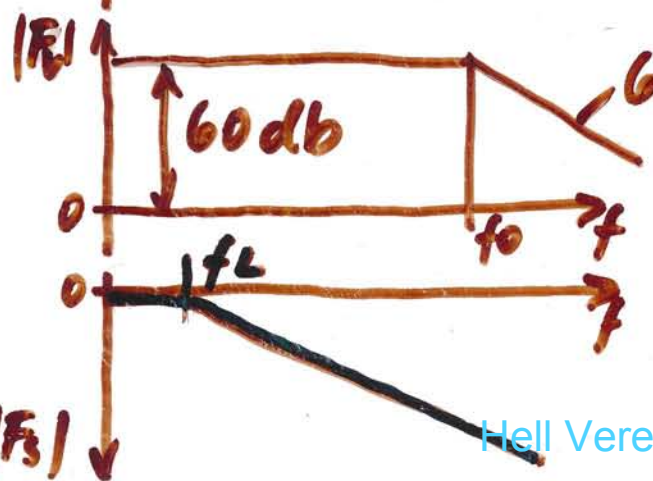
$$T_L = \frac{L}{R_S}$$

$$\omega_L = \frac{R_S}{L}$$

$$f_L = \frac{R_S}{2\pi L}$$



evtl. selektiv messen!  
 $R_1 = R_2$

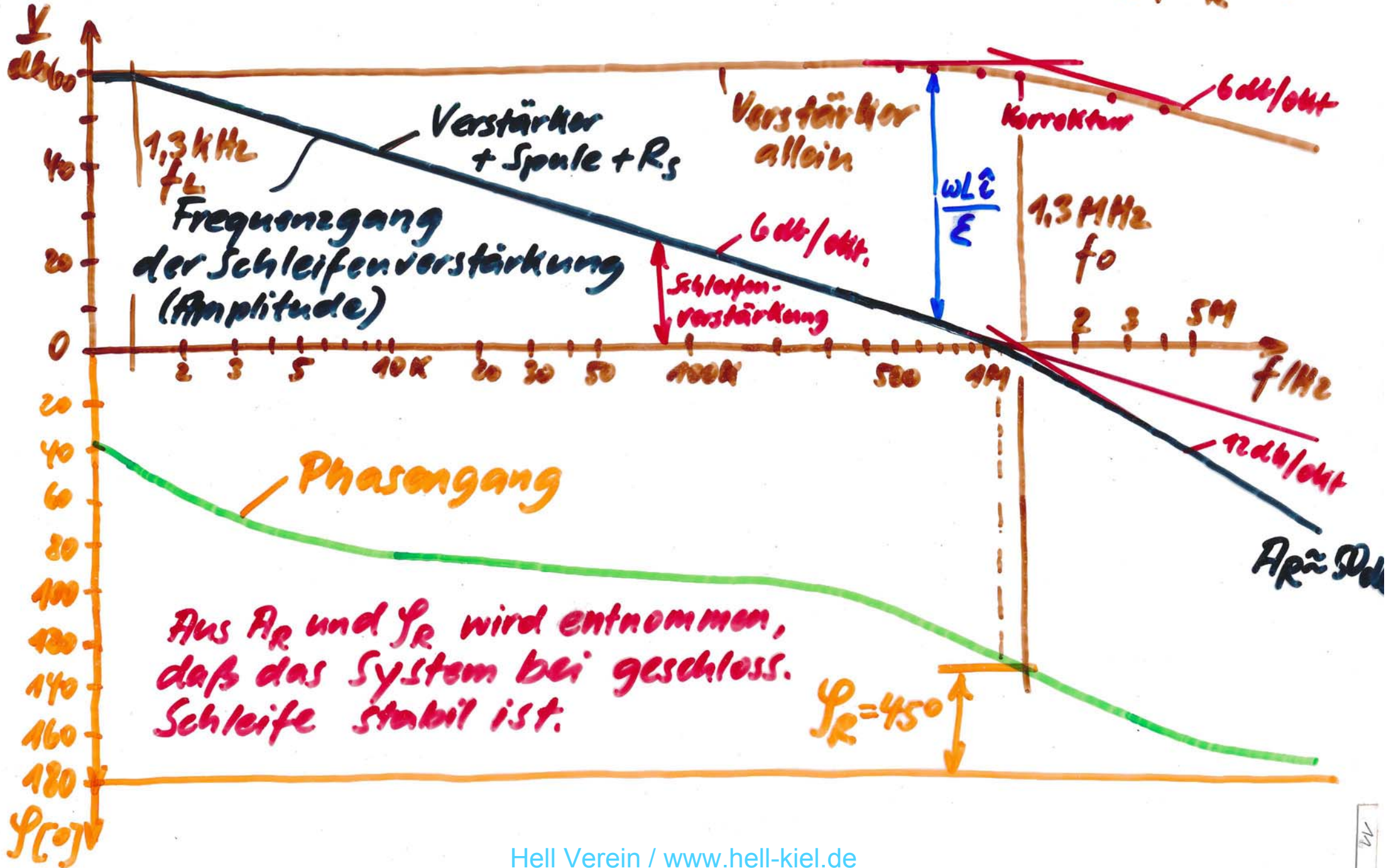


für Yebenso verfahren

Addition der 3 Kurven ergibt den Amplidengang der Schleifenverstärkung



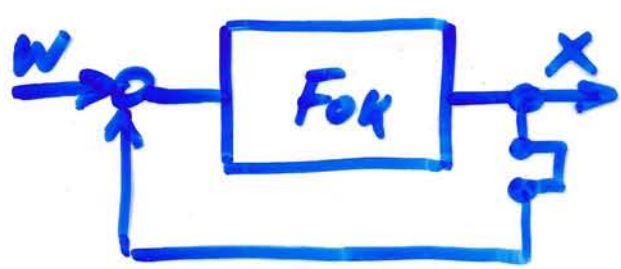
Annahme:  $R_1 \gg R_2$ ;  $F_R = 1$



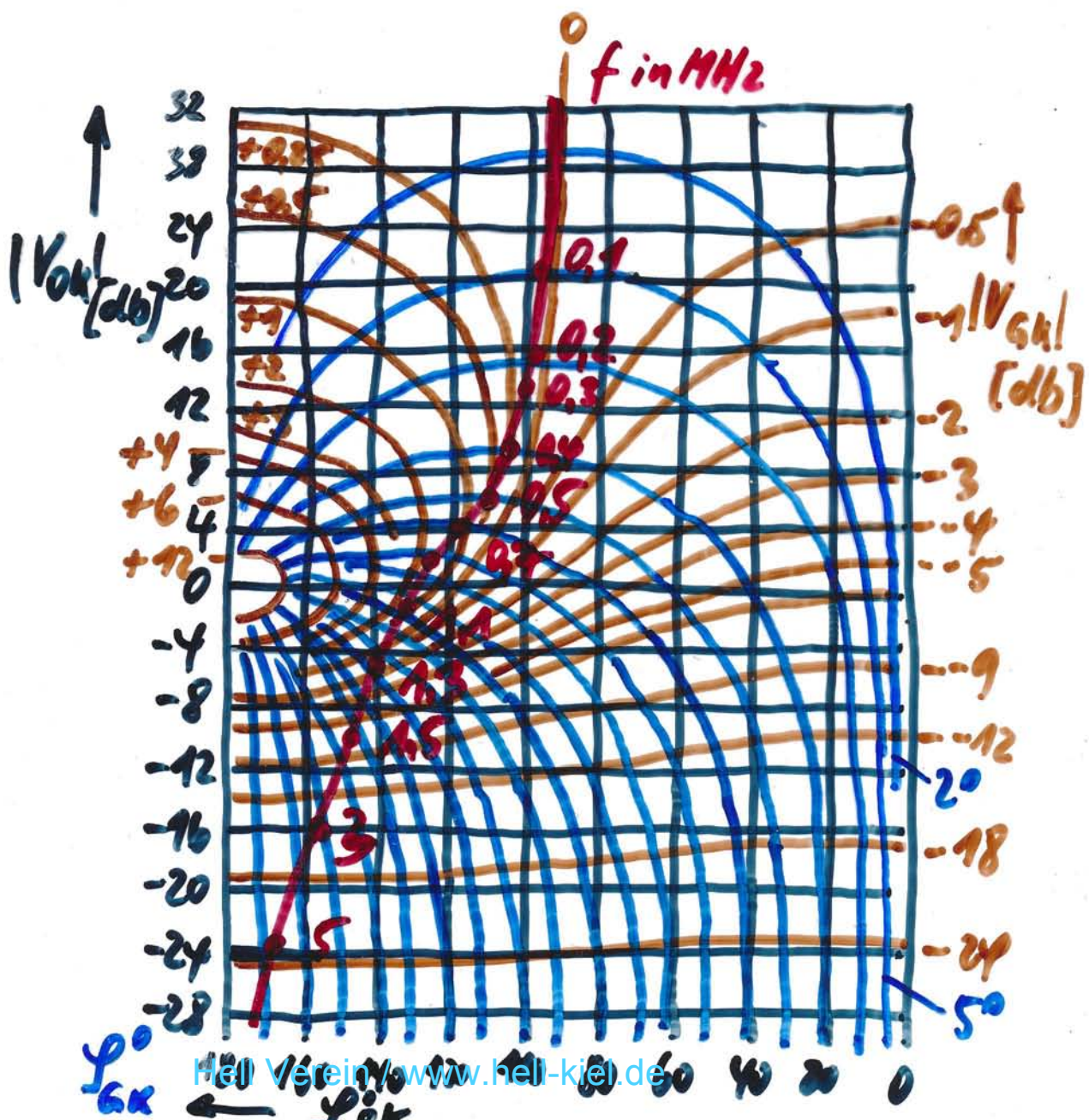


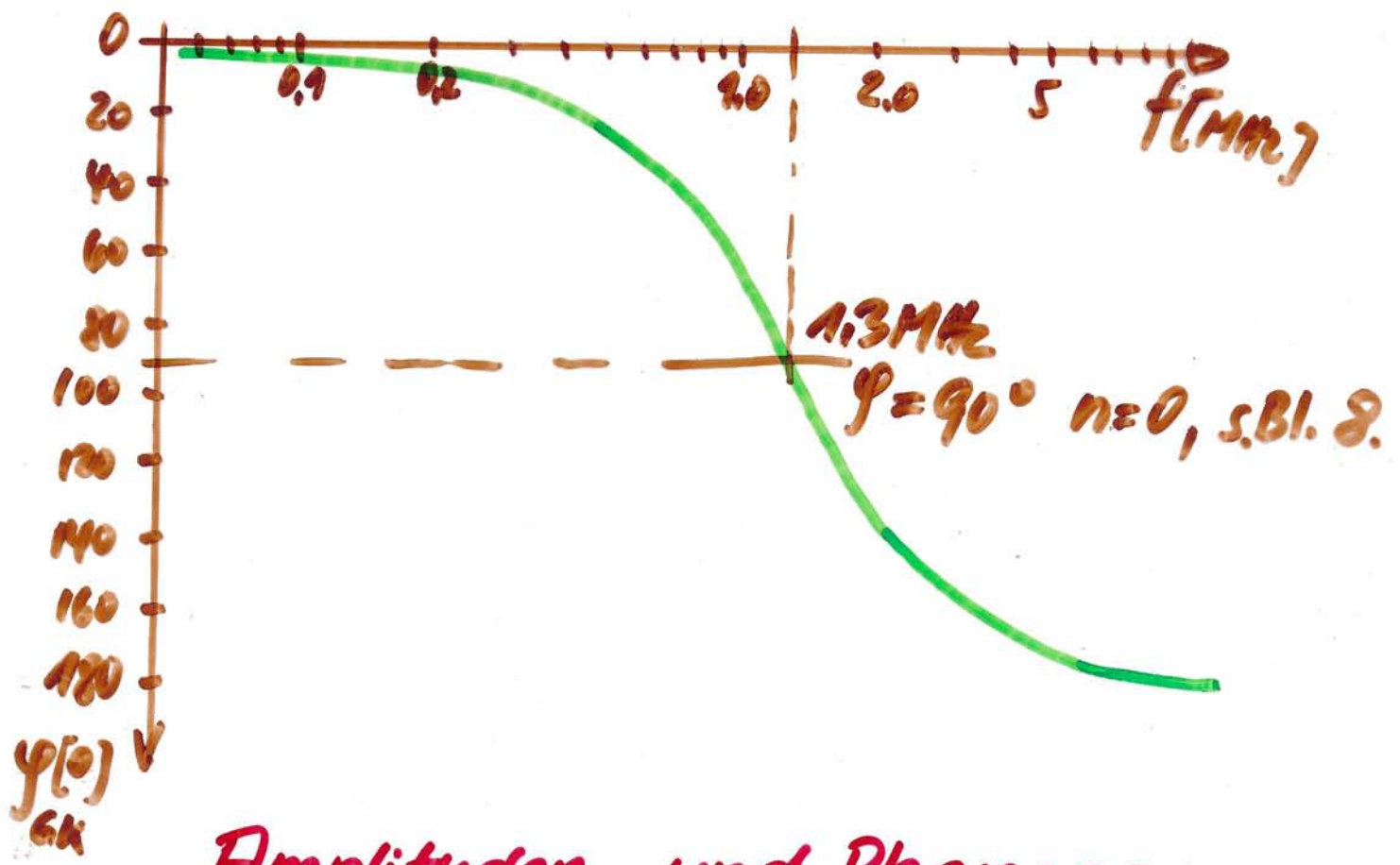
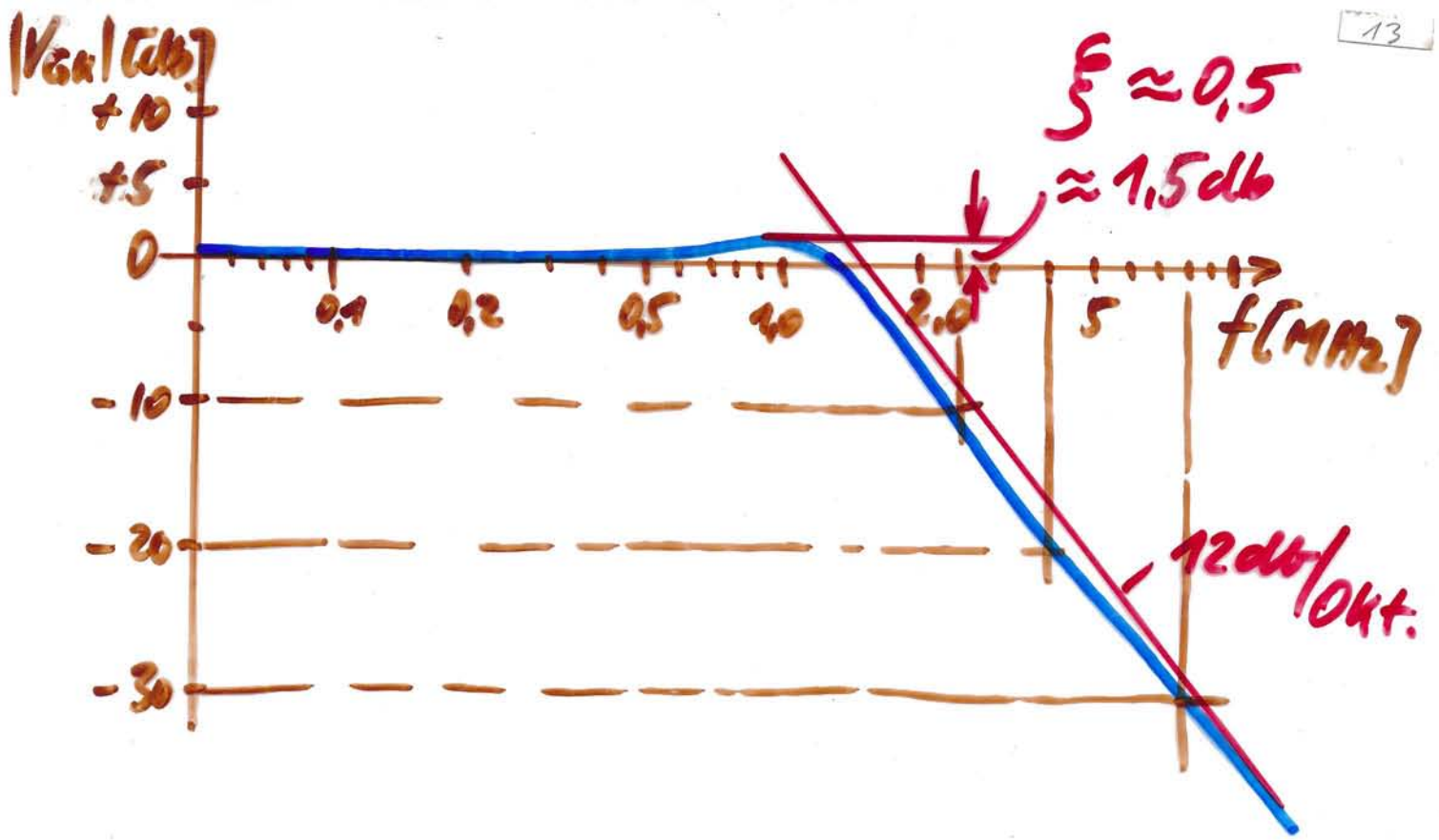
Bodediagramm<sup>ok.</sup> gibt keine Auskunft über Frequenzgang d. Amplitude u. d. Phase im geschlossenen System sowie des Einschwingverhaltens.

Transformation durch Nichols-Diagramm.



$$F_{Gk} = \frac{F_{0k}}{1 + F_{0k}}$$



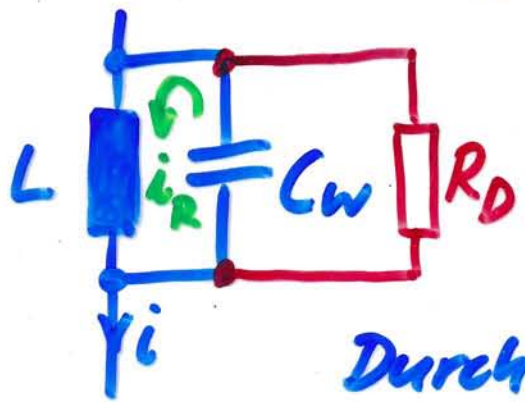


Amplituden- und Phasengang  
 des geschlossenen Systems nach  
 Auswertung des Nichols-Diagramms



Einfluß einiger bisher nicht berücksichtigter Fehler:

Wickel- und Leitungskapazität der Ablenkspule:

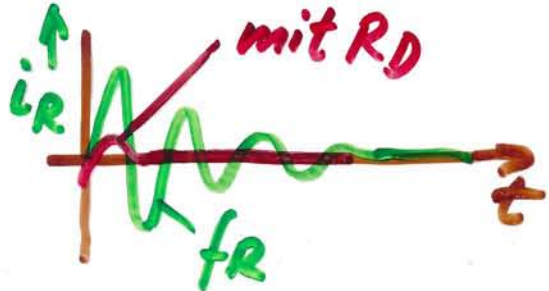


$L = 60 \mu H, C_w = 75 pF$

$f_R = 2,3 MHz$

Durch Messung ermittelt:  $f_R \approx 2 MHz$

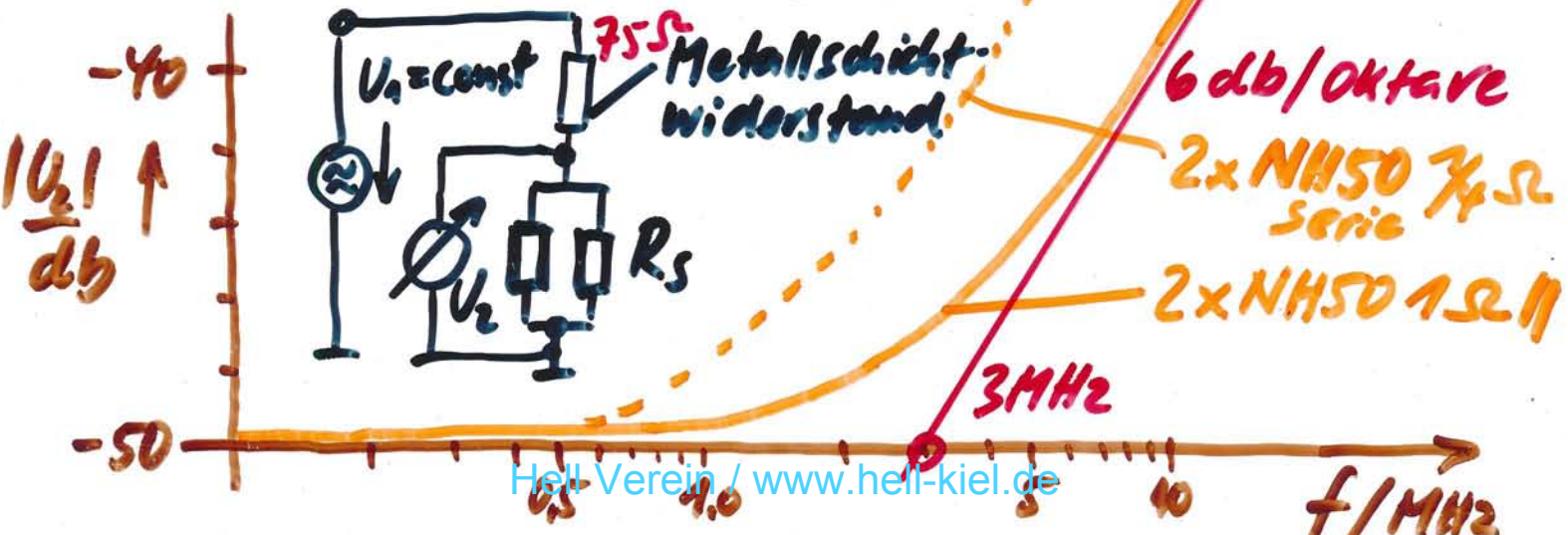
Q meistens  $> 1$  ( $\approx 5$ ), d.h. Resonanzüberhöhung  $i_R > i$



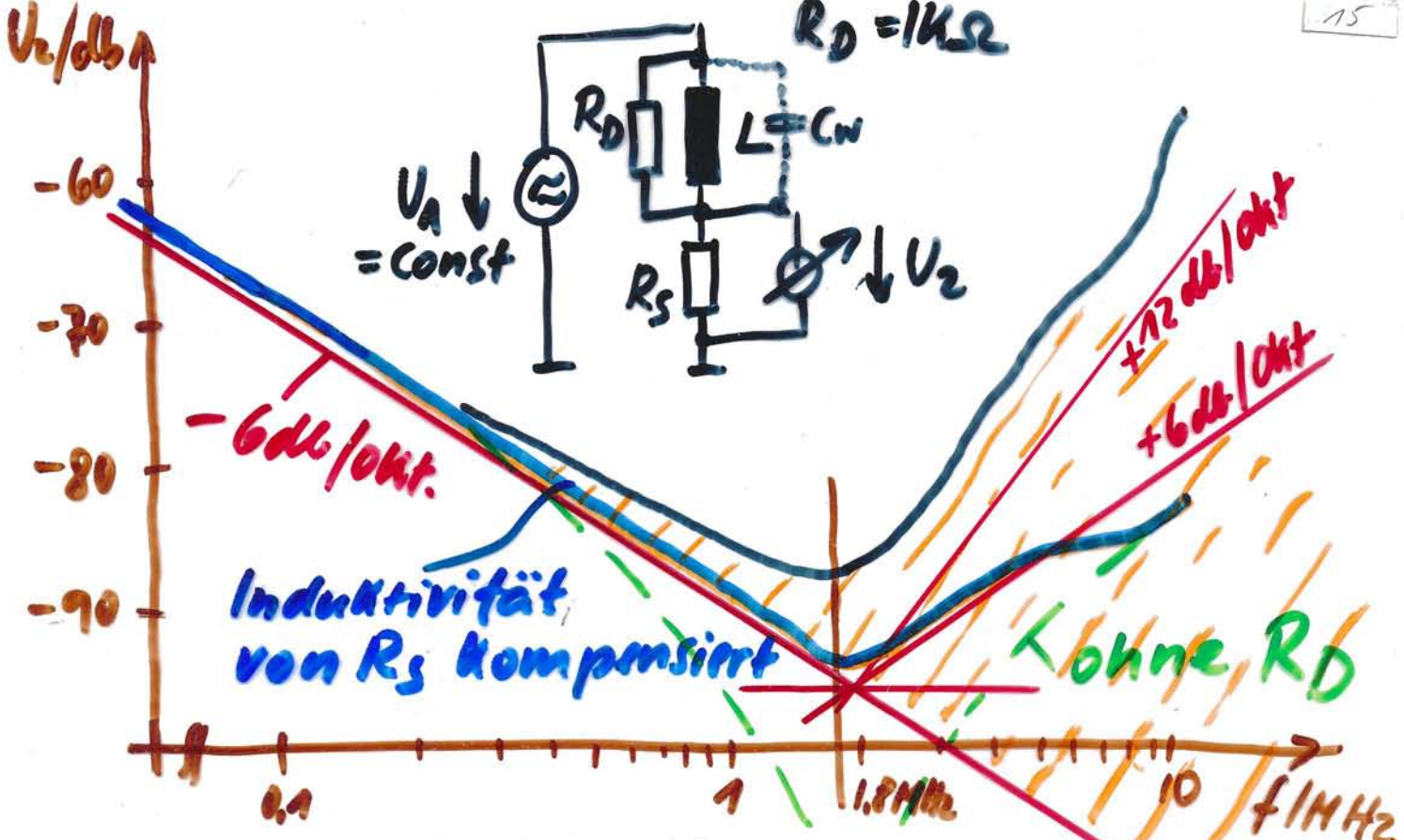
Bedämpfung  $R_D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$

gewählt:  $R_D = 1 k \Omega$  außen

Wicklungsinduktivität des Meßwiderstandes  $R_s$







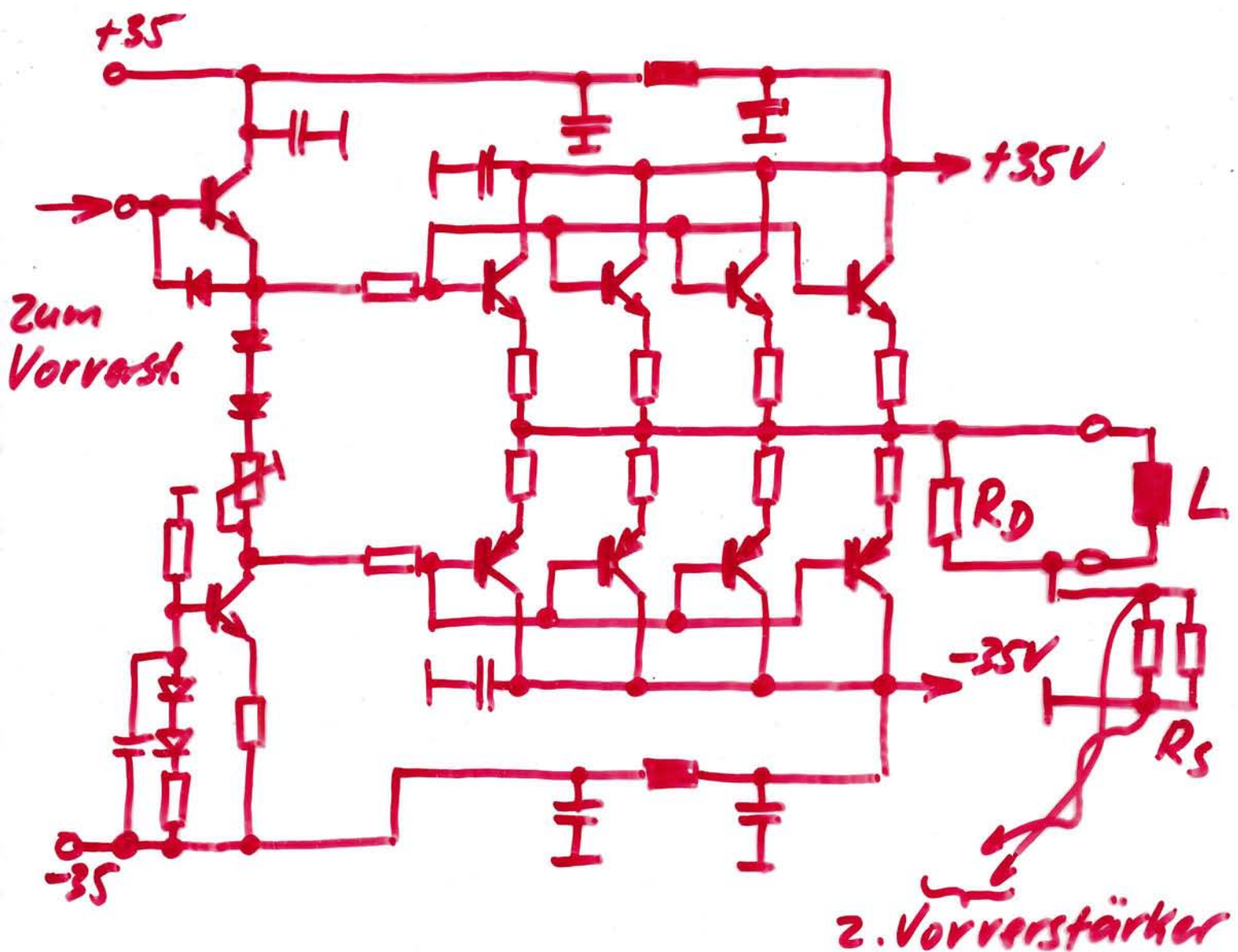
Einflüsse der Spulen-Resonanz und d. Induktivität des Meßwiderstandes  $R_S$  auf d. Bodediagr.

Beseitigung des III Bereiches durch definiertes Absenken der Verstärkung des Vorverstärkers mit 3 Verzög. 1. Ord.

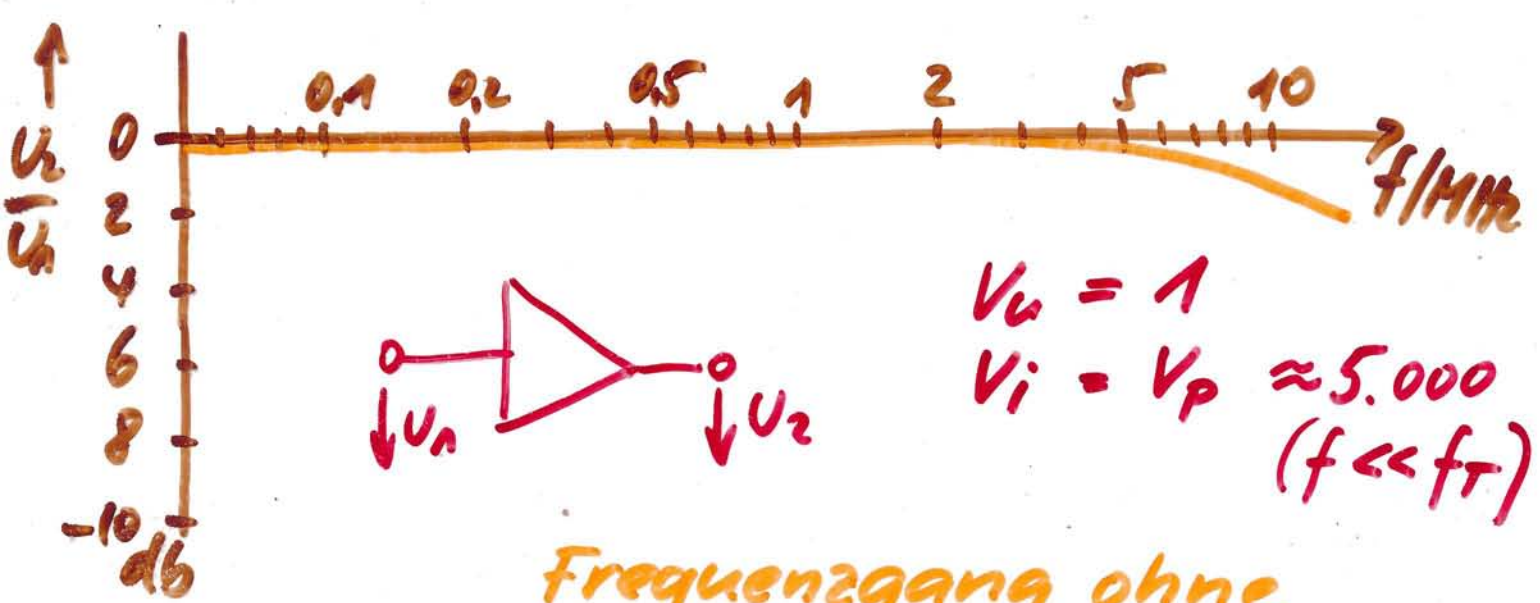
Der 3-stufige Vorverstärker wird so ausgelegt, daß seine Bandbreite  $> 5\text{ MHz}$  ist

Jede Stufe erhält einen Abgleichkondensator (gelötet!) zum einmaligen Anpassen an die Spulentypen. ( $C_1, C_3$  (nicht 1. Ordnung),  $C_5$ )

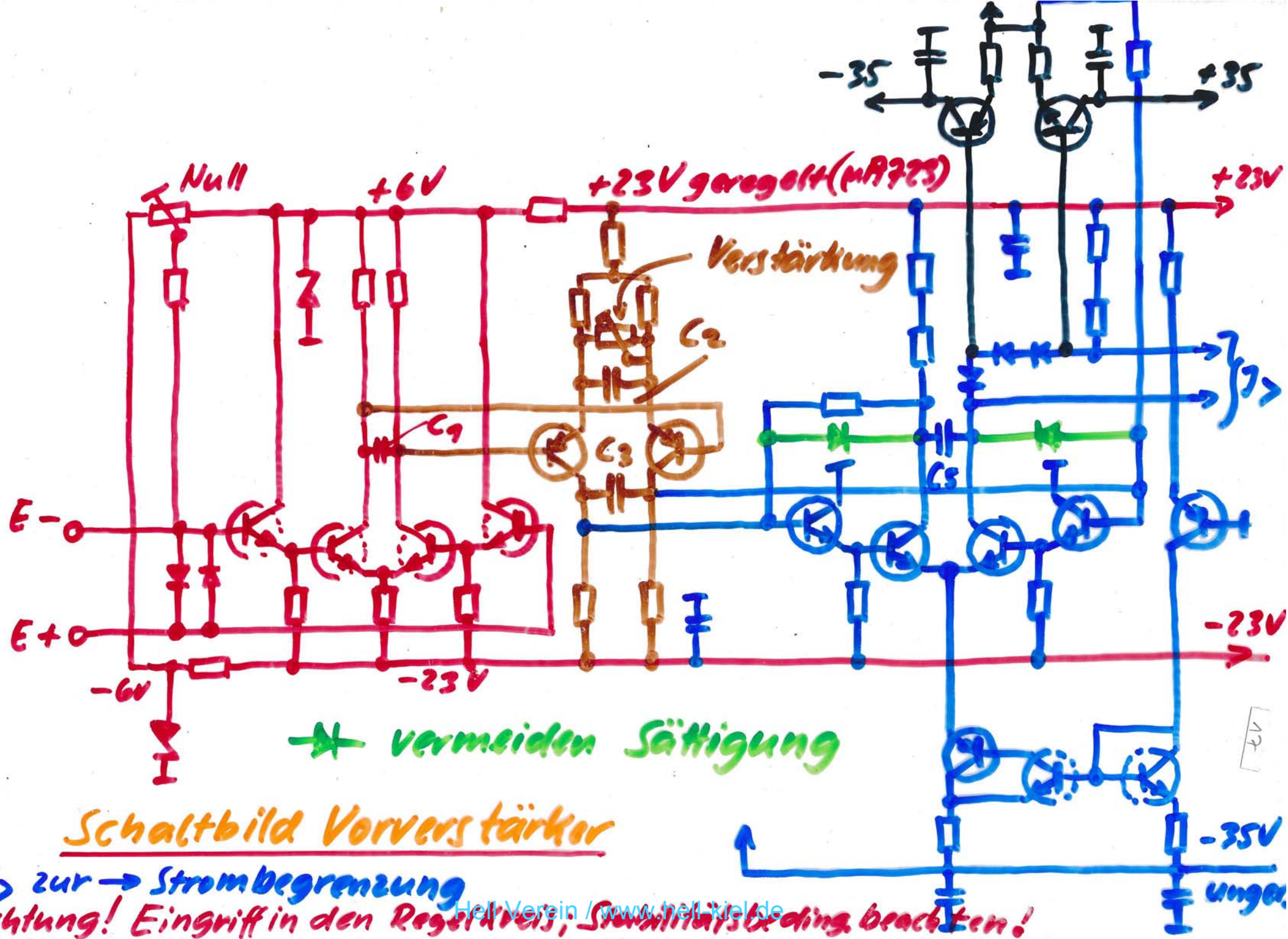




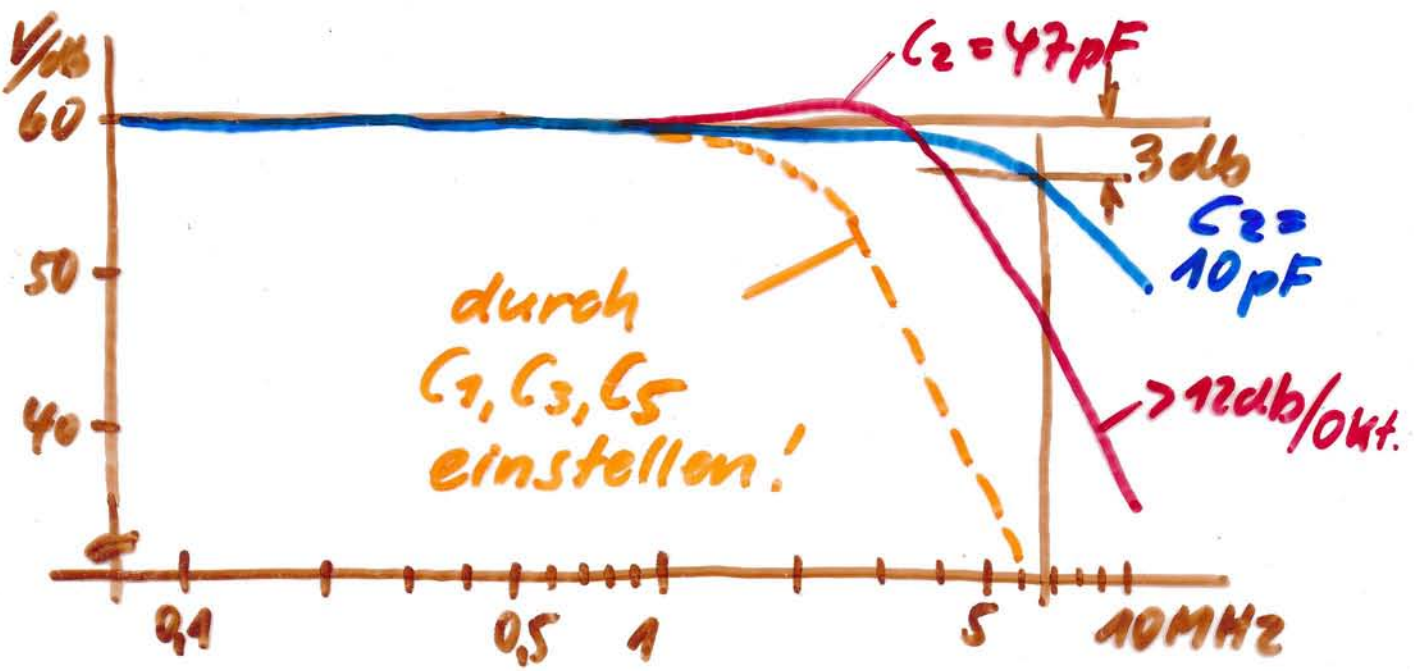
Endstufe des Ablenkverstärkers



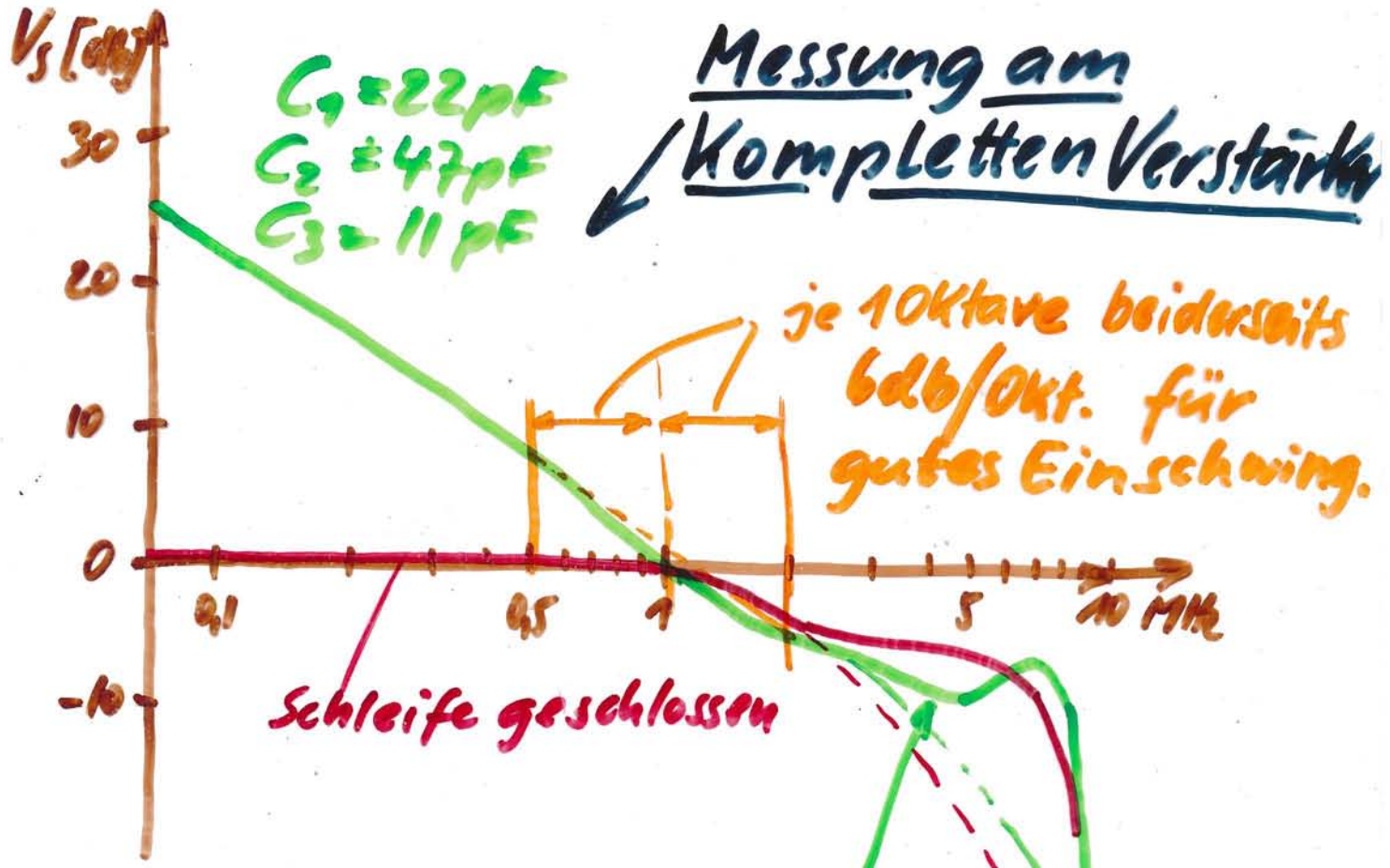
Frequenzgang ohne Ablenkspule,



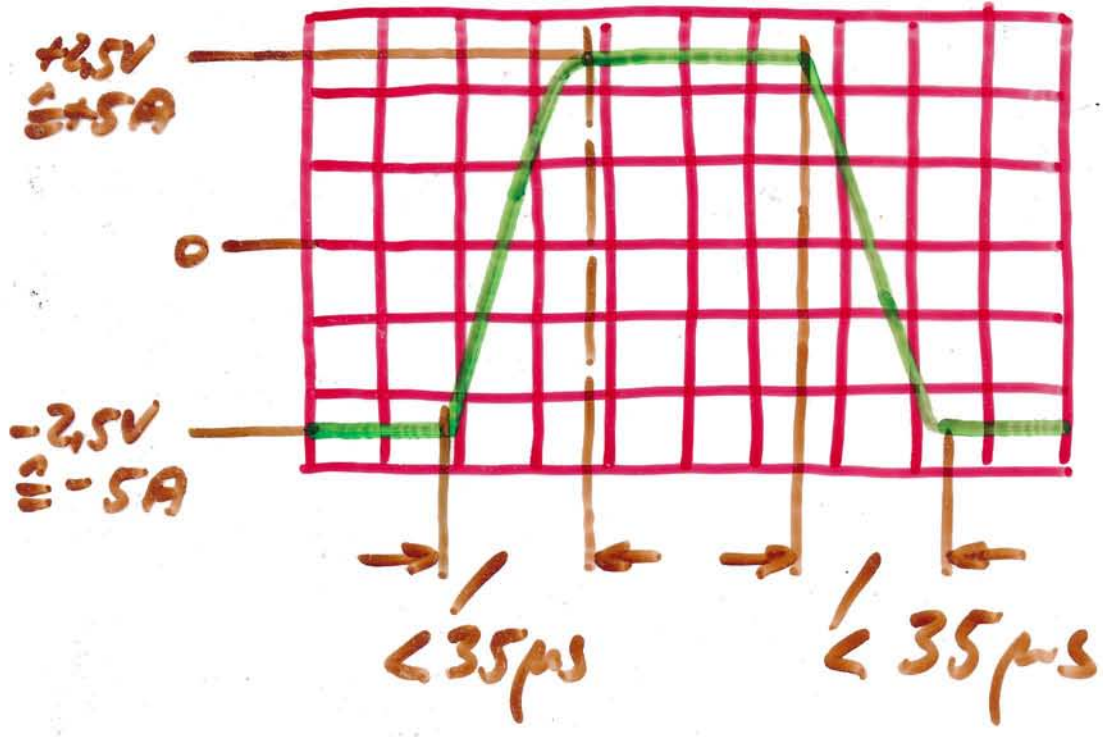
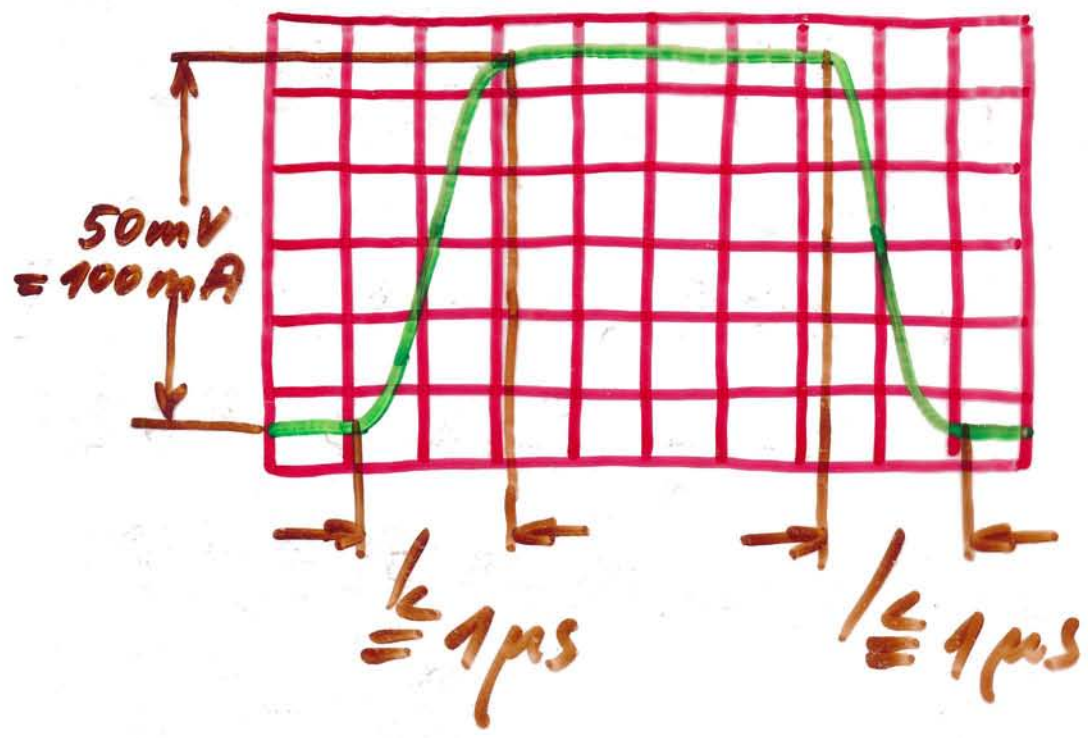




Frequenzgang des Vorverstärkers



Schleifenverstärkung  
( bei 1 kHz  $\rightarrow$  60 dB)

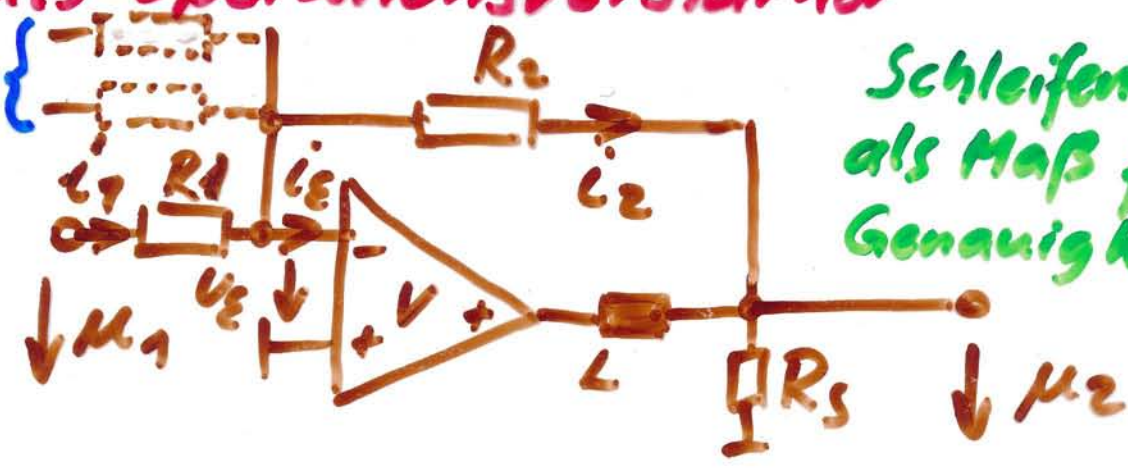


Ein schwingverhalten  
des Stromes (Prüfvorschrift)



# Betrachtung des Ablenkverstärkers als Operationsverstärker

zus. Eing.



Schleifenverstärk. als Maß für die Genauigkeit d. V.

Fall a)  $i_E = 0, V = \infty, u_E = 0$

$$i_1 = i_2 = u_a / R_1 = \mu_2 / R_2$$

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = -\frac{R_2}{R_1} = -n$$

Fall b)  $i_E = 0, V \neq \infty, u_E \neq 0$

$$\mu_E = \mu_1 - \mu_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\mu_E = -\frac{\mu_2}{V}$$

$$\mu_E = \mu_1 - K \mu_2 \quad | : \mu_2$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = K$$

$$\frac{\mu_E}{\mu_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} - K$$

$$\frac{1}{V} = \frac{\mu_1}{\mu_2} - K$$

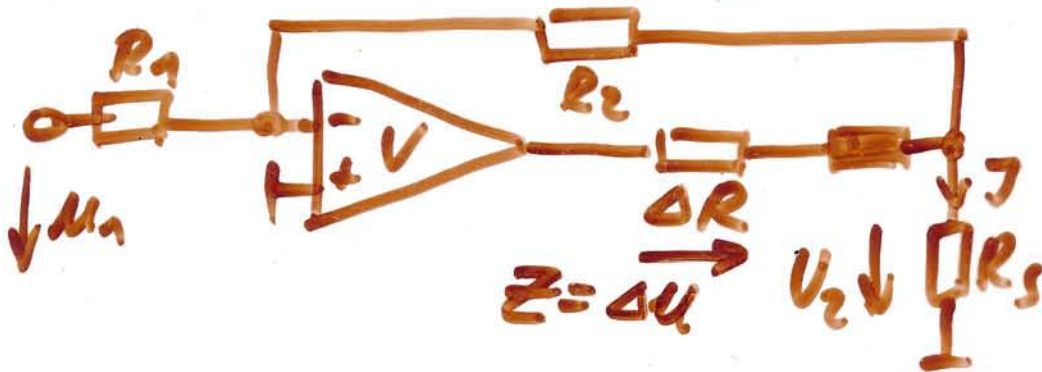
$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = K + \frac{1}{V} \left[ \frac{\mu_2 V}{\mu_1 (1 + KV)} \right] = \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \left[ \frac{1}{1 + \frac{1}{KV}} \right]$$

$$\frac{\mu_1}{\mu_E} = 1 + KV$$

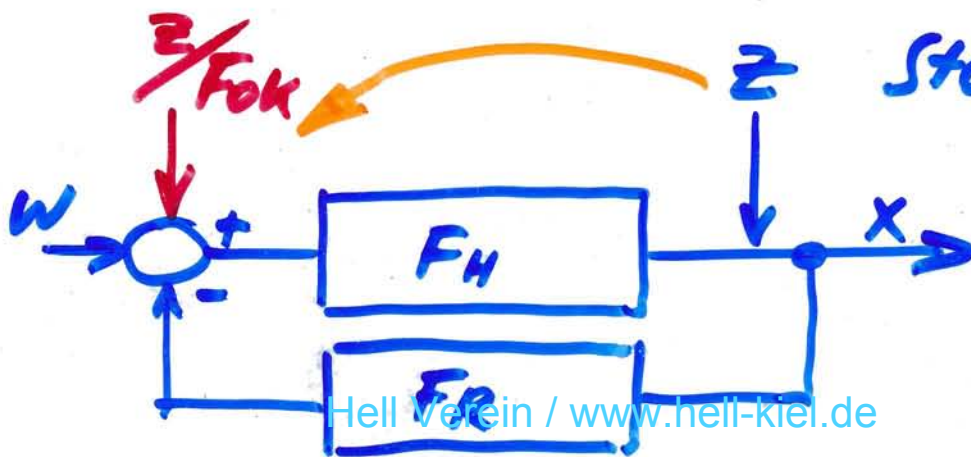
Schleifenverst.

# Ausregeln eines Fehlers

Beispiel: zusätzlicher Widerstand in der Spulenleitung



1. Einfügen von  $\Delta R$  bringt Verringerung von  $J$
2.  $U_2$  wird kleiner um  $\Delta U_2$
3.  $K \cdot \Delta U_2$  am Eingang des  $V$ .
4.  $V$  regelt am Ausgang um  $\Delta U$  nach; am Eingang bleibt als Fehler  $\frac{\Delta U}{V}$
5.  $J$  steigt wieder fast auf den alten Wert, Fehler um den Faktor  $K \cdot V$  reduziert (P-Regler)



Störgröße darf auf den Eingang bezogen werden nach Multipl.:  $\frac{1}{K \cdot V}$



Fehler, die der Regelverstärker nicht ausregeln kann:

a) Offsetspannung

Offsetdrift d. Eingangsstufe geht direkt ein; Drift der nachfolgenden Stufen wird auf den Eingang bezogen, indem Driftwert durch die Verstärkung der vorhergehenden Stufen geteilt wird.

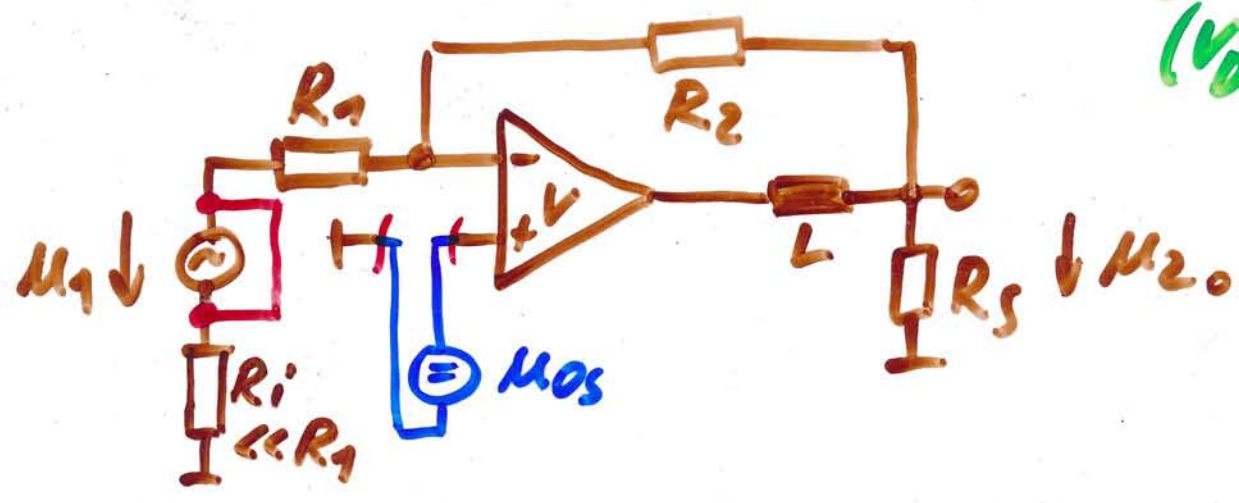
typischer Wert für den Ablenkverstärker:

$$\mu_{05} = 100 \mu V / ^\circ C$$

(davon  $50 \mu V / ^\circ C$  von der Eingangsstufe)

Dieser Wert ist zu multiplizieren mit der „Driftverstärkung“  $V_0$ :

$$(V_0 = \frac{1}{k})$$



$$\frac{\mu_{20}}{R_1 + R_2} = \frac{\mu_{05}}{R_1} ; \mu_{20} = \mu_{05} \frac{R_2 + R_1}{R_1}$$



b) Veränderungen des Meßwiderstands  
z.B. infolge Erwärmung.

Da der Regelverstärker die Spannung am Meßwiderstand abfragt u. mit d. Sollwert vergleicht, entsteht durch Widerstandsänd. ein Fehler im Strom.

Abhilfe:

- 1. Vorgealterte Widerstände
- 2. Kleiner  $t_k$  ( $\rightarrow \Delta R/R \approx 25 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ )
- 3. Überdimensionieren (z.B.  $10 \times P_{\text{Nenn}}$ )
- 4. Kühlkörper vorsehen

z.B.  $R_s = 0,5 \Omega$  }  $P = I^2 \cdot R = 12,5 W$   
 $I = 5 A$  }

Verwendet:  $2 \times 1 \Omega, 50 W$   
parallel, auf Kühlkörper

thermische Zeitkonstante: Minuten  
Fehler bei langsam wechselnder Last:  
im Promille-Bereich.



# Techn. Daten :

- Betriebsspannung :  $\pm 35V \pm 10\%$  , 7A
- elektr. Strombegr. : 5.2 ... 5.8 A
- Temperatursicherg. : 4 Kälteleiter  $120^{\circ}C$
- Ausgangsstrom :  $\pm 5A$
- Eingangswiderstand :  $47k\Omega$
- Schleifenverstärkung : 50...70 db einstellbar
- Anstiegszeit : 0.7A0A,  $L=60\mu H$  etc 25ps
- Kleinsignalbandbr. : 1MHz bei 50mAss
- Eingangsstrom \* :  $2.5\mu A$  max
- Offsetstromdrift \* :  $5nA/^{\circ}C$  max
- Offsetspannungsdrift \* :  $100\mu V/^{\circ}C$  typ.
- Drift bei  $\pm 10\% U_L$  :  $\pm 0.5mA$  typ.
- Drift nach Sprung  
 $I_L = 5A \rightarrow I_L = 0A$  :  $0.5mA$  typ. b. 60db Sch.V.
- Übersprechdämpfung  
bei 2 get. Spalten :  $> 80db$  (0...1MHz)
- Änderg d. Leerl. Verst.\* :  $< 0.3db/^{\circ}C$
- Drift d. Verstärkung  
durch äup. Beschaltg :  $50 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$
- Ausgangswiderst. \* :  $0.3\Omega$  typ.
- Netzbrummen i. Strom :  $200\mu Ass$  typ. b. Vollast
- Rauschen i. Strom :  $200\mu Ass$  typ.

\* ) gilt für den offenen Verstärker