

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

Studiengang Elektro- und Informationstechnik

Prüfungsfach: **Analoge Schaltungstechnik (SC), SoSe 2021**

Prüfungstermin: 23. Juli 2021 Studiengruppe: EI4, ISE4

Prüfungsdauer: 90min (planmäßig: 14:15-15:45h), Raum S054, Platz: _____

Zugelassene Hilfsmittel: alles, abzugeben sind handschriftliche Lösungsblätter

Aufgabensteller: Prüfungsteil Prof. Dr. Martin Schubert

Prüfungsteilnehmer/in: (Bitte leserlich in Druckbuchstaben) Sem.: _____

Name: _____

Vorname: _____ MatNr: _____

Zusätzliche Blätter können nur dann gewertet werden, wenn Sie durch Angabe der >Prüfung, des Namens, des Datums und der bearbeiteten Aufgabe **eindeutig zuzuordnen** sind !

Maximal erreichbare Punktzahl: 100 Punkte

Runden Sie Zahlenwerte typischerweise auf drei Dezimalstellen oder auf so viele, wie offensichtlich notwendig sind (z.B. $x=0,9997$, wenn das Ergebnis $x<1$ sein muss).

>>>>> **Rot ist Korrekturfarbe, bitte keinen Rotstift verwenden !** <<<<<<

Weitere Hinweise:

1. Die Aufgaben sind so aufgebaut, dass Folgefehler nach Möglichkeit vermieden werden. Nach „Rechnen Sie weiter mit...“ ist unbedingt mit dem gegebenen Wert weiterzurechnen.
2. Kalkuliert wurde ein Zeitbedarf von ca. einem Punkt pro Minute. Verwenden Sie nicht zu viel Zeit für Aufgaben, die nur wenige Punkte bringen.

Punkte:	Note:	Datum:	Prüfer: Prof. Dr. M. Schubert
---------	-------	--------	-------------------------------

1 Grundlagen: Kirchhoff

(Σ=20P)

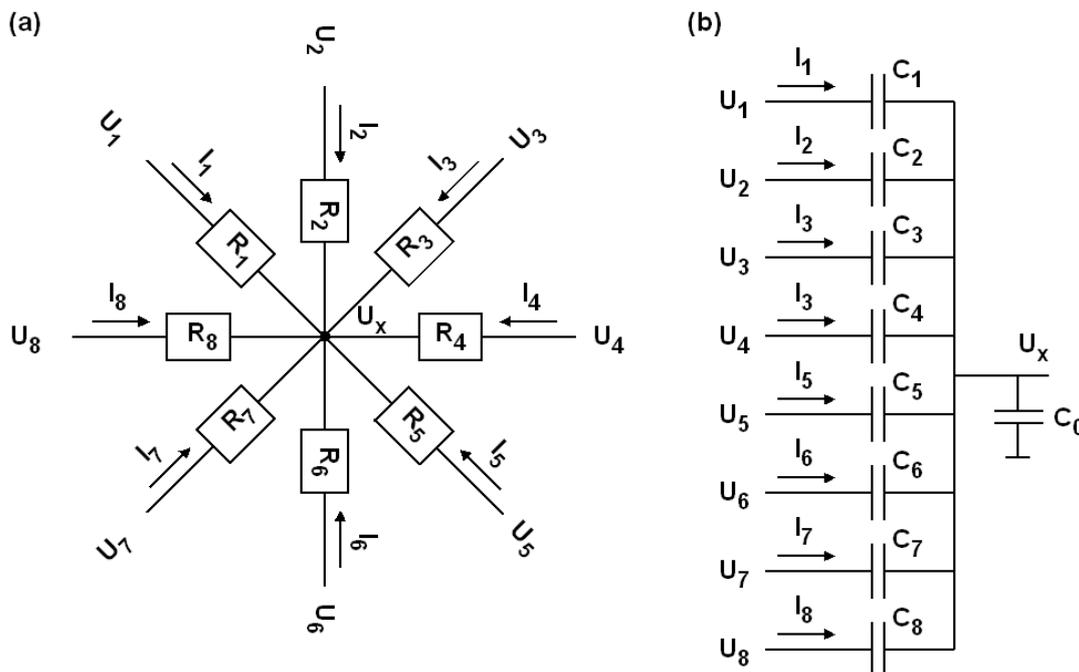


Bild 1: (a) Stromsumme und (b) Ladungssumme im Knoten x mit Spannung U_x .

(a) Bild 1 (a) zeigt einen Knoten, in den über die 8 Widerstände R_k die Ströme I_k fließen, $k=1..8$. Berechnen Sie nach Kirchhoff die Spannung U_x am inneren Kreuzknoten als Funktion von U_1, \dots, U_8 . Tipp: Es rechnet sich leichter mit den Leitwerten $G_k = 1/R_k$. Sie dürfen die Symbole G_{sum} und R_{par} für $G_{sum} = \sum_{k=1}^8 G_k$ und $R_{par} = 1/G_{sum}$ verwenden.

(6P)

(b) Wir wollen das Netzwerk in Bildteil (a) als D/A-Wandler verwenden. Die Spannungen U_k , $k=1..8$, in Bildteil (a) können nur die Werte 0V und 1V annehmen. Berechnen Sie die Widerstände R_k so, dass $U_x = \sum_{k=1}^8 a_k U_k$ mit $a_{k+1} = 2 \cdot a_k$ und $Maximum(R_k) = 128K\Omega$ (4P)

k :	1	2	3	4	5	6	7	8	
R_k :									KΩ

(c) Berechnen Sie G_{sum} und R_{par} für den DAC für den Fall $G_I = 1/R_I = 1\mu\text{S}$. (3P)

(d) Was sind die kleinst- und der größtmöglichen Spannungswerte ($U_{x,min}$ und $U_{x,max}$) am Ausgang des DACs, wenn für $U_k, k=1\dots 8$, nur die Werte 0V und 1V möglich sind? (2P)

(e) Wie viele verschiedene Spannungslevel (NoL) sind einstellbar und wie groß ist der kleinstmögliche Spannungssprung (Δ_{DA}) am Ausgang des DACs? (3P)

Bildteil (b) zeigt einen Knoten, in den über die 9 Kapazitäten C_k die Ladungen Q_k fließen, $k=0\dots 8$. Wir nehmen an, dass anfangs alle Spannungen auf 0V liegen bevor einige auf 1V springen.

(f) Wie lässt sich mit Kirchhoff zeigen, dass die Summe aller Ladungen in den Knoten mit der Spannung U_x gleich Null sein muss? (Argumentation genügt, es muss keine Formel sein.) (2P)

2 Schaltkreisanalyse-Methoden

($\Sigma=20P$)

Bild 2: Schaltung mit MOSFET. Ziffern in Kreisen sind Knotennamen.

Zur Berechnung sind gemäß Vorlesung folgende Modellgleichungen zu verwenden:

$$U_{DS,sat} = U_{GS} - V_T$$

$$I_D = \frac{\beta}{2} \cdot U_{DS,sat}^2 (1 + \lambda \cdot U_{DS}) \quad \text{für } U_{DS} \geq U_{DS,sat}$$

$$g_m = \sqrt{2\beta \cdot I_D}, \quad r_m = 1/g_m$$

$$g_{DS} = \lambda I_D, \quad r_{DS} = 1/g_{DS}$$

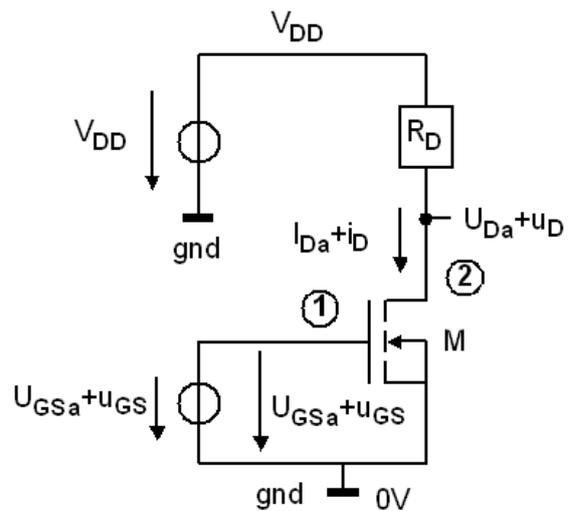


Bild 2 zeigt eine Verstärkerschaltung mit Feldeffekt-Transistor. Gegeben seien $V_T = 1\text{ V}$, $\lambda = 1/100\text{ V}$ und folgende Messdaten: $U_{GSa} = 2\text{ V}$, $U_{Da} = 10\text{ V}$, $I_{Da} = 1\text{ mA}$ bei $V_{DD} = 20\text{ V}$.

- (a) In welcher Schaltungsart (z.B. Gate-, Drain-, Basis-, Kollektor, ... Schaltung) wird dieser Transistor betrieben? (1P)

Berechnung des Arbeitspunktes

- (b) Welche Spice-Direktive gibt den berechneten Arbeitspunktes aus? (1P)

- (c) Der Drainstrom im Arbeitspunkt betrage 1 mA. Berechnen Sie den Widerstand R_D und die Spannung U_{DSa} im Arbeitspunkt. (Gefragt sind jeweils Formel und Wert.) (2P)

- (d) Klären Sie, ob $U_{DS} \geq U_{DS,sat}$ erfüllt ist. Nehmend Sie dann an, dass $U_{DS} \geq U_{DS,sat}$ erfüllt ist und berechnen Sie den Transistorparameter β . (3P)

Analysemethoden

- (e) Es soll ein statisches Kennlinienfeld berechnet werden, zum Beispiel $I_D(U_{GS}, U_{DS})$. Mit welcher Spice-Direktive machen wir das am besten? (1P)
- (f) Welche *Spice*-Direktive fordert die Berechnung des DC-Kleinsignal-ESBs und deren Ausgabe an? (1P)
- (g) Welche Spice-Direktive fordert ein Bode-Diagramm mit dem AC-Kleinsignal-ESB an? Es genügt die Benennung der Direktive, ohne Zusatzparameter. (1P)
- (h) Skizzieren Sie das DC-Kleinsignal-ESB der Schaltung in Bild 2. (4P)
- (i) Sei $\beta = 2\text{mA/V}^2$. Berechnen Sie die Kleinsignalgrößen g_{ma} , r_{ma} , g_{DSa} , r_{DSa} , Z_{2a} (=Impedanz des Knotens mit Label 2) als Größen im Arbeitspunkt, sowie die Kleinsignalverstärkung $A_{Va} = u_D/u_{GS}$ im Arbeitspunkt. Gefragt sind Formeln und Werte. (6P)

3 Operationsverstärker

($\Sigma=20P$)

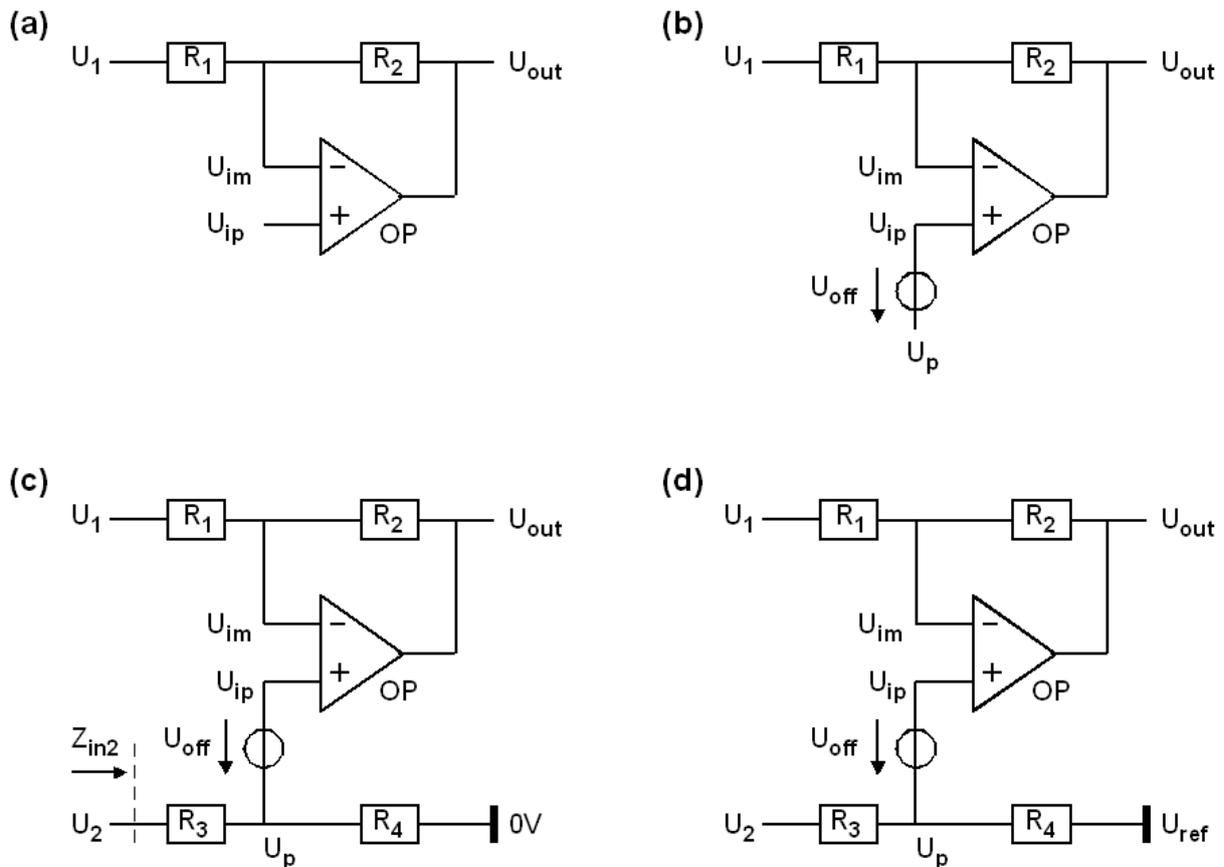


Bild 4: Idealer Operationsverstärker: (a) kombinierter Invertierer und Nichtinvertierer (b) Hinzufügen der Offsetspannung U_{off} , (c) Erzeugen von U_p durch Spannungsteiler R_3, R_4 , (d) Messen aller auf 0 bezogenen Potentiale gegen U_{ref} .

(a) Wie berechnet sich die Ausgangsspannung U_{out} in Bildteil (a) als Funktion der Spannungen U_1, U_{ip} und der Widerstände R_1 und R_2 ?

(3P)

(b) Welche Beziehung besteht zwischen den Spannungen U_p und U_{ip} in Bildteil (b) und wie berechnet sich damit U_{out} in Bildteil (b) als Funktion von U_1, U_p, U_{off} und R_1, R_2 ? Als Lösung bitte einen Ausdruck ohne Klammern!

(4P)

- (c) Welche Beziehung besteht zwischen den Spannungen U_2 und U_p in Bildteil (c) und wie berechnet sich U_{out} in Bildteil (c) als Funktion von U_1 , U_2 , U_{off} und R_1 , R_2 , R_3 , R_4 ? Als Lösung bitte einen Ausdruck ohne Klammern!

(5P)

- (d) Erklären Sie (gern auch ohne Formeln), wie wir von der Lösung zu Bildteil (c) auf

$$(U_{out} - U_{ref}) = -\frac{R_2}{R_1}(U_1 - U_{ref}) + \frac{R_4}{R_1} \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} (U_2 - U_{ref}) + \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{off}$$

als Lösung zu Bildteil (d) kommen. Zu erklären ist die Frage: Warum darf U_{ref} so in die Gleichung eingebaut werden? Warum wird von U_{off} nicht U_{ref} abgezogen?

(4P)

- (e) Eliminieren Sie in Lösung (d) die Widerstandswerte R_3 und R_4 durch die Gleichungen $R_3 = R_1$ und $R_4 = R_2$ und berechnen Sie U_{out} als Funktion von $(U_1 - U_2)$, U_{ref} , U_{off} , R_1 , R_2 .

(3P)

$$U_{out} =$$

- (f) Welche Eingangsimpedanz „sieht“ die Spannungsquelle U_2 in Bildteil (c)?

(1P)

$$Z_{in2} =$$

4 Macro-Modellierung (Σ=20P)

Ziel: Wir wollen für einen vollständig differentiellen OpAmp ein Spice-Macro erzeugen.

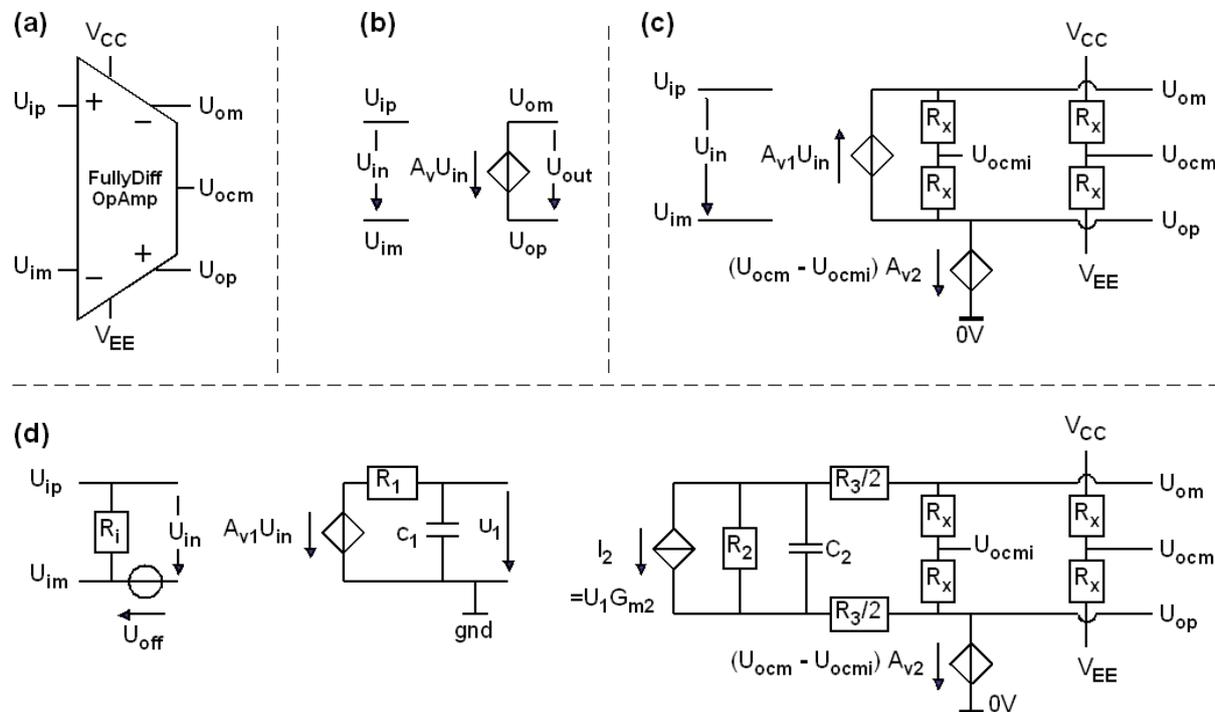


Bild 4 (a): Symbol, **(b) - (d):** verschiedene Macro-Modelle.

(a) Der „FullyDiff OpAmp“ in Fig. 4(a) wird in Bildteil (b) als spannungsgesteuerte Spannungsquelle modelliert. Warum können wir dieses Modell als Makro für Bildteil (a) nicht gebrauchen? Stellen Sie eventuell an einem kleinen Beispiel das Problem dar. (2P)

(b) In Bildteil (c) tauchen die Potentiale U_{ocm} und U_{ocmi} auf. Füllen Sie die Textlücken zu deren Beschreibung:

(5P)

Der Mittelwert der Ausgangsspannungen U_{om} und U_{op} heißt Er berechnet sich

 zu und wird mit dem Innenwiderstand

 zur Verfügung gestellt. Der Sollwert für U_{ocmi} heißt Er berechnet sich in Bild 4

 zu und wird mit dem Innenwiderstand

 zur Verfügung gestellt.

- (c) Die Schleife zur Regelung von U_{ocmi} verursacht einen Fehler $U_{ocm,err} = U_{ocmi} - U_{ocm}$ gegenüber dem Sollwert. Berechnen Sie $U_{ocm,err}$ als f(U_{ocm} , U_{out} , A_{V2}), wobei gemäß Bildteil (b) $U_{out} = U_{op} - U_{om}$ und $U_{op} = -A_{V2} \cdot U_{ocm,err}$. (4P)

$$U_{ocmi} = U_{op} + \frac{1}{2} U_{out}$$

$$U_{ocm,err} = U_{ocmi} - U_{ocm}$$

Was muss tendenziell angestrebt werden, damit der Offsetfehler gegen Null strebt? (1P)

- (d) Bildteil (d) zeigt das Macro-Modell eines zweistufigen, vollständig differentiellen Operationsverstärkers, wobei die Stufen an den Indizes der Bauelemente ('1' und '2') zu erkennen sind. Berechnen Sie DC-Spannungsverstärkung $A_{V1,DC}$ und Pol ω_{p1} der 1. Stufe. (Formeln als Funktion der Bauelementeparameter) (2P)

$$A_{V1,DC} =$$

$$\omega_{p1} =$$

Sei R_{out} die Ohm'sche Impedanz zwischen den Ausgangsknoten U_{om} und U_{op} . Formel zur Berechnung von R_{out} ? (2P)

$$R_{out} =$$

Berechnen Sie die DC-Spannungsverstärkung $A_{V2,DC}$ und den Pol ω_{p2} der unbelasteten 2. Stufe. (Formeln als Funktion der Bauelementeparameter) (3P)

$$A_{V2,DC} =$$

$$\omega_{p2} =$$

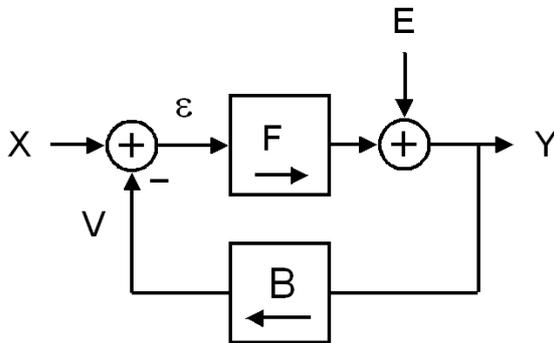
Was ist die $STF(s)$ des OpAmp-Macros? Bitte Formel als f($A_{V1,DC}$, $A_{V2,DC}$, ω_{p1} , ω_{p2}). (2P)

$$STF(s) =$$

5 Rückgekoppelte Systeme

($\Sigma=6P$)

(a)



(b)

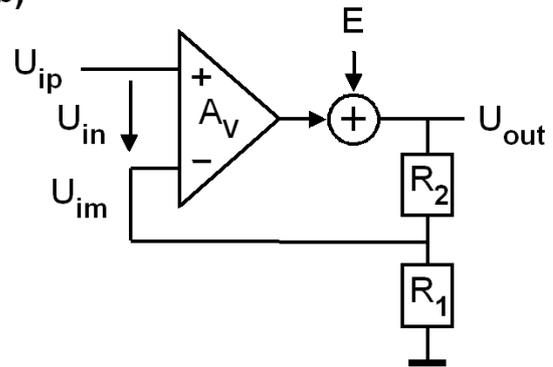


Bild 5 (a): Prinzip der Rückkopplung, **(b):** Anwendung.

(a) Fig. 5(a) zeigt ein rückgekoppeltes System. Geben Sie die Definition der Signal-Transferfunktion (*STF*) als $f(X, Y, E)$ an und dessen Formel als $f(F, B)$.

(2P)

(b) Fig. 5(a) zeigt ein rückgekoppeltes System. Geben Sie die Definition der Fehler-Transferfunktion (*NTF*) als $f(X, Y, E)$ an und dessen Formel als $f(F, B)$.

(2P)

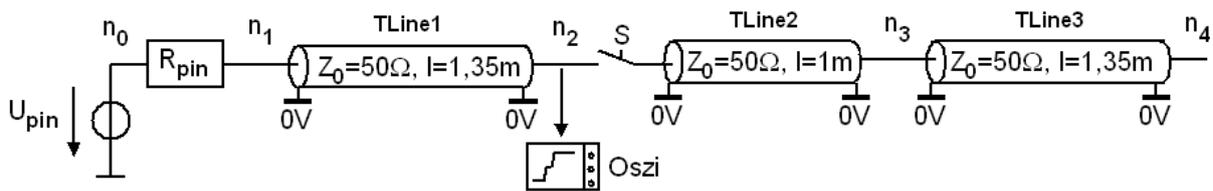
(c) In Bild 5(b) sei $A_V = 60 \text{ dB}$, $R_2 = 9 \cdot R_1$. Welche Werte ergeben sich für *STF* und *NTF*?

(2P)

6 Signalflanke auf Leitungen

($\Sigma=14P$)

(a) Messaufbau



(b) S offen: ohne Leitungen $TLine2$, $TLine3$

(c) S leitend: mit Leitungen $TLine2$, $TLine3$

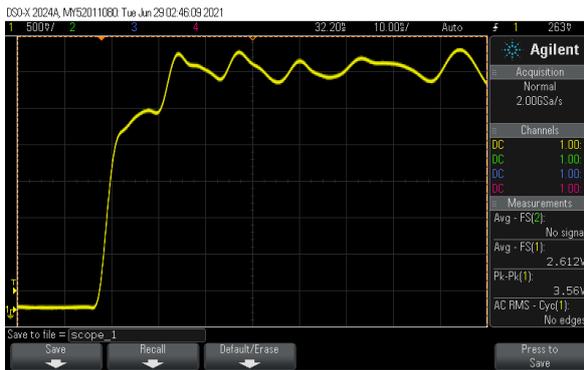


Bild 6 (a): Messaufbau, **(b)** Schalter S offen: Messung an n_2 ohne $TLine2$ und $TLine3$.
(c) Nach Schließen von Schalter S : Zusätzliches 20ns breites 1,43V-Plateau in der Flanke.

In Bildteil 6(a) ist der Knoten n_1 ein Ausgangspin eines digitalen Boards ($DE1-SoC$), elektrisch modelliert als Spannungsquelle U_{pin} mit Innenwiderstand R_{pin} . An Knoten n_1 werden ein oder drei 50Ω -BNC-Leitungen reflexionsfrei in Serie geschaltet, die am Ende offen sind.

- (a) An welchem Knoten tritt in dieser Anordnung bei leitendem Schalter S Reflexion mit welchem Reflexionsfaktor auf? Eventuelle kleine Reflexionen an n_1 sind zu ignorieren. (2P)
- (b) Die Bildteile (b) und (c) zeigen Oszillogramme des Knotens 2. Es handelt sich um eine 0 / 3,3V-Technologie. Auf welchen Wert werden sich die Spannungen an allen leitend angeschlossenen Knoten einige Zeit nach dem Sprung einschwingen? (1P)
- (c) In Bildteil (b) ist Schalter S offen und in Bildteil (c) geschlossen, also leitend. Durch Schließen von S entsteht in Bildteil (c) ein Plateau auf 1,43V mit 20ns Breite in der steigenden Flanke. Wo in der Messanordnung (Knoten?) ist der Spannungsteiler für hohe Frequenzen? (1P)

- (d) Berechnen Sie aus dem Teilverhältnis des Spannungsteilers den Widerstand R_{pin} .
(Formel + Wert) (2P)
- (e) Ermitteln Sie aus der Differenz der Bildteile (b) und (c) die Geschwindigkeit c_{BNC} der Welle auf der 50Ω -BNC-Leitung. (Formel + Wert) (2P)
- (f) Die Verzögerung von 1 Meter 50Ω -BNC-Leitung sei $4,5\text{ns}$. Berechnen Sie die Induktivität L_x und die Kapazität C_x für diesen Leitungsmeter. (Formel + Wert) (3P)
- (g) Sei $L_x = 220\text{nH}$ und $C_x = 85\text{pF}$. Zeichnen Sie das T-Modell dieses Leitungselements mit den Werten der verwendeten Bauelemente. (3P)