

Klausur zur Vorlesung Schaltungstechnik

TU Berlin, Sommersemester 2015, 29.07.2015

Bearbeitungszeit: 3 Stunden

| |
|---|
| Name (Nachname, Vorname): |
| Matr.-Nr.: |
| Studiengang: |
| BSc / MSc / Diplom: |
| Erasmus- oder Gast-Student/in: Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> |

| Aufgabe: | Punkte: |
|----------------|--------------|
| 1 | / 22 |
| 2 | / 20 |
| 3 | / 40 |
| 4 | / 24 |
| 5 | / 14 |
| Gesamt: | / 120 |
| | |

| | | |
|-------|--------|---------------|
| Note: | Datum: | Unterschrift: |
|-------|--------|---------------|

Bitte füllen Sie auf dieser Seite nur die weißen Felder aus.

Füllen Sie bitte ebenso auf allen abgegebenen Seiten jeweils die Kopfzeile aus und verwenden Sie nur dieses Papier für die Lösung der Aufgaben.

Viel Erfolg!

Aufgabe 1:

Gegeben ist die in Abbildung 1 gezeigte Schaltung, die eine CMOS-Implementierung einer logischen Verknüpfung realisiert.

- Ermitteln Sie durch Betrachtung des Pull-Down- oder des Pull-Up-Pfads den logischen Ausdruck, der durch diese Schaltung realisiert wird. Geben Sie die Funktion z in möglichst einfacher Form an. 4
- Setzen Sie die logische Funktion dieser Schaltung auf Gatterebene um. Verwenden Sie dazu ausschließlich NAND-Gatter mit zwei Eingängen und Inverter. Formen Sie dazu zunächst den Ausdruck für z nach De Morgan um und skizzieren Sie die sich ergebende Schaltung. 7
- Wie viele MOS-Transistoren enthält Ihre in b) skizzierte Schaltung, wenn die Gatter als CMOS-Gatter realisiert werden (kurze Begründung oder Angabe der Transistoranzahl pro Gatter in b)). 2
- Skizzieren Sie ein NAND-Gatter aus Aufgabenteil b) auf Transistorebene. Nehmen Sie an, dass alle Transistoren dieses Gatters mit minimaler Kanallänge L_{min} realisiert werden und dass die nMOS-Transistoren eine Weite W_n haben. Gehen Sie davon aus, dass die nMOS-Transistoren etwa die zweifache Stromtreibfähigkeit der pMOS-Transistoren besitzen (d.h., dass $k_n \approx 2 k_p$ gilt). 5

Weisen Sie den pMOS-Transistoren eine Weite W_p zu und geben Sie diese als Funktion von W_n an. Verwenden Sie als Kriterium, dass die Worst-Case-Stromtreibfähigkeiten von Pull-Up- und Pull-Down-Pfad in etwa identisch sein sollen. Begründen Sie Ihre Wahl für W_p kurz.

- Betrachten Sie nun noch einmal die in der Abbildung skizzierte Schaltung und nehmen Sie an, dass auch hier alle Transistoren minimale Kanallänge L_{min} haben. Nehmen Sie ferner an, dass die nMOS-Transistoren *innerhalb des eingerahmten Teils der Schaltung* eine Weite W_n haben. Gehen Sie auch hier davon aus, dass die nMOS-Transistoren etwa die zweifache Stromtreibfähigkeit der pMOS-Transistoren besitzen (d.h., dass $k_n \approx 2 k_p$ gilt). 4

Weisen Sie auch hier den pMOS-Transistoren *innerhalb des eingerahmten Teils der Schaltung* eine Weite W_p zu, geben Sie diese als Funktion von W_n an und begründen Sie Ihre Wahl kurz. Kriterium ist auch hier, dass die Worst-Case-Stromtreibfähigkeiten von Pull-Up und Pull-Down-Pfad in etwa identisch sein sollen.

Summe: 22

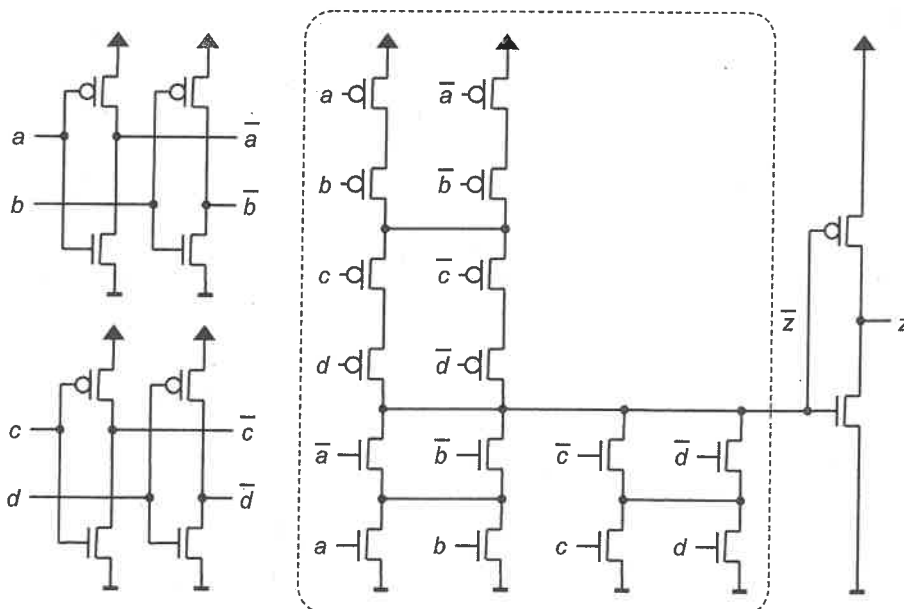


Abbildung 1

Aufgabe 2:

Die in Abbildung 2 gezeigte Schaltung bildet die Eingangsspannungen U_1 , U_2 und U_3 in bestimmter Form auf die Ausgangsspannung U_{aus} ab. Die Schaltung soll im Folgenden schrittweise analysiert werden.

Betrachten Sie dazu die Operationsverstärker als ideal. Die Betrachtung von Betriebsspannungsgrenzen ist in den Aufgabenteile a) - c) und e) nicht erforderlich, sondern nur in Aufgabenteil d).

- Geben Sie die Spannung am nicht-invertierenden Eingang von OP₂ (im folgenden als U_4 bezeichnet) an als Funktion der Eingangsgrößen der Schaltung und der verwendeten Widerstände, die in diesem Kontext eine Rolle spielen. 2
- Geben Sie die Spannung am invertierenden Eingang von OP₂ (im folgenden als U_5 bezeichnet) an als Funktion der Eingangsgrößen der Schaltung und der verwendeten Widerstände, die in diesem Kontext eine Rolle spielen. Begründen Sie das Ergebnis kurz. 3
- Berechnen Sie mit den Ergebnissen aus den Aufgabenteilen a) und b) nun die Ausgangsspannung U_{aus} als Funktion aller Eingangsspannungen und der in der Schaltung verwendeten Widerstände. 5

Hinweis: Führen Sie die Berechnung dadurch durch, dass Sie zunächst die Stromsumme im Knoten 5 berechnen (welcher mit dem invertierenden Eingang von OP₂ verbunden ist und an welchem die Spannung U_5 anliegt).

- Es wird nun davon ausgegangen, dass die Schaltung mit einer symmetrischen Betriebsspannung mit den Werten $U_{DD} = 5\text{ V}$ und $U_{SS} = -5\text{ V}$ betrieben wird. Die Widerstände werden folgendermaßen dimensioniert: $R_1 = R_2 = R_3 = 10\text{ k}\Omega$, $R_4 = 8\text{ k}\Omega$ und $R_5 = 20\text{ k}\Omega$. Für die ersten beiden Eingangsspannungen werden die festen Werte $U_1 = 1\text{ V}$ und $U_2 = 3\text{ V}$ gewählt. 6

Berechnen Sie unter diesen Bedingungen U_{aus} als Funktion von U_3 quantitativ für den Fall, dass die Schaltung nicht in Begrenzung durch die Betriebsspannungen läuft, und geben Sie sie an. Skizzieren Sie dann diese Funktion für Werte $U_{SS} \leq U_3 \leq U_{DD}$ unter Berücksichtigung der Grenzen des Aussteuerbereiches der Operationsverstärker durch die Betriebsspannungen. Vergessen Sie bitte nicht, die Achsen Ihres Diagramms mit Einheiten und Zahlenwerten zu versehen.

Hinweis: Um diese Zeichnung einfach, zügig und quantitativ hinreichend präzise erstellen zu können, wird empfohlen, das Arbeitsblatt zu dieser Aufgabe zu verwenden.

- Es wird nun ein Widerstand $R_6 = 10\text{ k}\Omega$ zwischen den Ausgängen beider Operationsverstärker eingeführt. Geben Sie rein qualitativ an (d.h. keine Rechnung erforderlich!), inwiefern sich Ausgangsspannung U_{aus} als Funktion aller Eingangsspannungen und der in der Schaltung verwendeten Widerstände ändert. Begründen Sie Ihre Aussage kurz. 4

Summe: 20

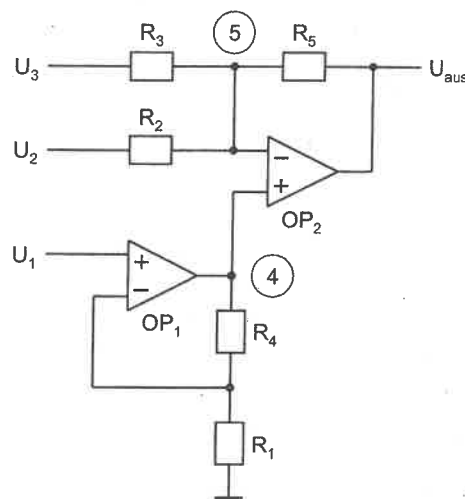


Abbildung 2

Aufgabe 3:

Gegeben ist die in Abbildung 3 skizzierte Differenzstufe mit differentiellem Eingang und differentiellem Ausgang, die im Folgenden analysiert werden soll. Die Betriebsspannung U_{DD} beträgt 3.3 V, wichtige Technologieparameter sind $L_{min} = 0.35 \mu\text{m}$, $k_p = 56 \mu\text{A} / \text{V}^2$, $U_{th,p} = 640 \text{mV}$ (Betrag).

Hinweis: Sollten Sie bei bestimmten Aufgabenteilen kein Ergebnis erzielen, beachten Sie bitte dennoch die Aufgabenstellung der folgenden Aufgabenteile, da nicht alle Aufgabenteile thematisch aneinander gekoppelt sind und unmittelbar von Ergebnissen aus vorherigen Aufgabenteilen abhängen.

- a) Zeichnen Sie ein Kleinsignal-Ersatzschaltbild der Schaltung (für Betrieb bei niedrigen 4
Frequenzen) und benennen Sie alle darin vorhandenen Größen.
Die Tatsache, dass der Knoten "0" kleinsignal-mässig auf Masse liegt, darf als bekannt vorausgesetzt werden. Nutzen Sie diese Kenntnis in Ihrer Skizze explizit aus, führen Sie aber noch keine weiteren Näherungen ein.
Für den Knoten zwischen Source der Transistoren T_{11} und T_{12} und den Widerständen $R_{11} = R_{12}$ führen Sie bitte die Spannungen U_{11} und U_{12} ein.
Wählen Sie für Transistoren gleicher Funktion gleiche Indizes, so z.B. für T_{11} und T_{12} für deren Steilheit g_{m1} ($= g_{m11} = g_{m12}$), für die Widerstände $R_{11} = R_{12}$ nur den Parameter R usw.
- b) Nehmen Sie an, dass alle Transistoren in Sättigung betrieben werden und machen Sie nun 8
Gebrauch von der Tatsache, dass $g_m \gg g_{DS}$ gilt. Leiten Sie unter dieser Rahmenbedingung ein vereinfachtes Näherungs-Ersatzschaltbild aus dem Ersatzschaltbild aus Aufgabenteil a) ab, in welchem Sie den Parameter g_{DS} aller Transistoren vernachlässigen.
Bedenken Sie dabei auch, dass für die nach der Näherung verbleibenden Elemente der Transistoren T_{21} und T_{22} eine besonders einfache Darstellung möglich ist und wenden Sie diese an.
Berechnen Sie mit diesem Ersatzschaltbild eine Näherung für die Kleinsignal-Verstärkung dieser Schaltung.
Hinweise:
i) Sie erhalten ein vollkommen symmetrische Ersatzschaltbild mit einem linken und einem rechten Zweig. Aufgrund der Symmetrie können Sie Ein- und Ausgangsspannung jeweils symmetrisch auf beide Zweige aufteilen und die Verstärkungsberechnung mit nur einem Zweig anstellen, was die Berechnung stark vereinfacht.
ii) Sie können Ihr Ergebnis überprüfen, indem Sie $R = 0$ setzen. Sie erhalten eine aus Vorlesung und Übung gut bekannte Schaltung!
- c) Für die Transistoren T_0 , T_{11} und T_{12} wird die Länge $L = 0.8 \mu\text{m}$ gewählt, für den Transistor T_0 2
die Weite $W_0 = 36 \mu\text{m}$.
Dimensionieren Sie die Weite W_1 der Transistoren T_{11} und T_{12} so, dass sie, unter der Bedingung, dass T_0 , T_{11} und T_{12} in Sättigung sind, mit der gleichen effektiven Gatespannung wie Transistor T_0 betrieben werden.
- d) Berechnen Sie die Weite W_2 der Transistoren T_{21} und T_{22} so, dass der Betrag der Verstärkung 9
der Schaltung für $R = 0$ den Wert 6 annimmt unter der Bedingung, dass alle Transistoren in Sättigung betrieben werden und dass die Länge der Transistoren T_{21} und T_{22} $L = 2.0 \mu\text{m}$ beträgt.
- e) Es wird $U_{bias} = 840 \text{mV}$ gewählt. Bestimmen Sie unter den Bedingungen, die Sie aus 8
Aufgabenteil d) erhalten haben, den Bereich der Common-Mode-Eingangsspannung, innerhalb dessen alle Transistoren in Sättigung betrieben werden. Geben Sie dazu jeweils eine kurze Skizze (oder Erklärung) und die entsprechenden Spannungswerte an.
Hinweis: Falls Ihnen aus Aufgabenteil d) kein Wert für W_2 für die Transistoren T_{21} und T_{22} vorliegt, rechnen Sie bitte mit den Geometrien $W/L = 1.8 \mu\text{m} / 2.0 \mu\text{m}$ für diese Transistoren.
- f) Für welchen Wert R_{max} des Widerstandes R wird der Bereich der Common-Mode- 5
Eingangsspannung, innerhalb dessen garantiert ist, dass alle Transistoren in Sättigung sind, gleich 0? (Bitte Skizze oder kurze Begründung zur Rechnung anfügen)
- g) Zeichnen Sie die Komplementärschaltung und erweitern Sie diese um wenige (real verfügbare) 4
Elemente, mit denen die Arbeitspunktgröße U_{bias} erzeugt wird.

Summe: 40

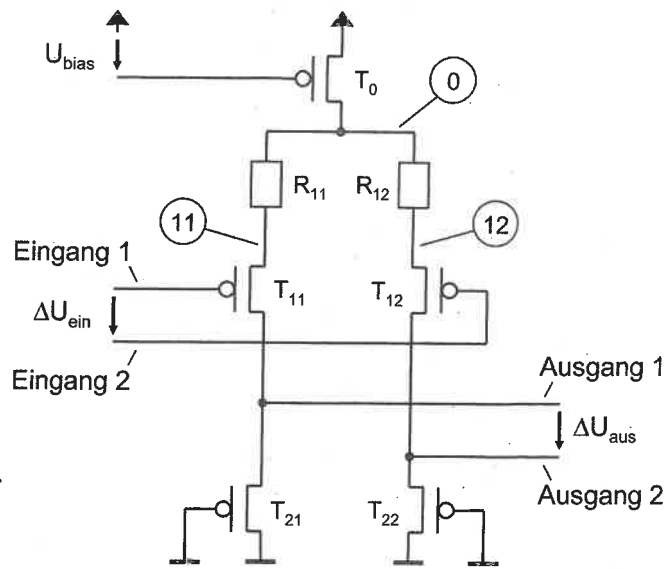


Abbildung 3

Aufgabe 4:

Gegeben ist die in Abbildung 4 gezeigte Logik-Schaltung mit vier logischen Eingangsvariablen a , b , c und d , die auf eine Ausgangsvariable z abgebildet werden. Als Zwischenvariablen werden die Variablen x und y eingeführt.

- a) Bestimmen Sie zunächst den logischen Ausdruck für die logische Variable x als Funktion der Eingangsvariablen a und b . 8
Betrachten Sie zunächst die entsprechenden vier Gatter. Geben Sie für diese explizit die logischen Funktionen am Ausgang eines jeden Gatters an. Insbesondere die durch Ablesen erhaltene Funktion am Ausgang der beiden Gatter, die das Gatter mit Ausgang x treiben, lassen sich vereinfachen. Führen Sie diese Vereinfachung durch und geben Sie schließlich auch eine möglichst einfache Version des Ausdrucks x an.
Geben Sie dann ebenso den logischen Ausdruck für die Variable y als Funktion der Eingangsvariablen c und d an.
- b) Vervollständigen Sie die Wahrheitstabelle zu der Schaltung für die Variablen x , y , und z . 6
Benutzen Sie dazu Arbeitsblatt (1) zu dieser Aufgabe. Eine explizite Angabe von z ist nicht nötig.
Übertragen Sie das Ergebnis auch in das KV-Diagramm (KV-Diagramm 1), welches im Arbeitsblatt (2) zu dieser Aufgabe gegeben ist.
- c) Bilden Sie im KV-Diagramm 3 im Arbeitsblatt zu dieser Aufgabe die EXOR-Verknüpfung Ihres Ergebnisses aus Aufgabenteil b) (KV-Diagramm 1) und der logischen Funktion f , die im KV-Diagramm 2 im Arbeitsblatt dieser Aufgabe gegeben ist. Die neue logische Funktion wird mit g bezeichnet. Lesen Sie die Funktion g in möglichst einfacher Form aus dem Diagramm ab und geben Sie sie an. 8
- d) Geben Sie eine Schaltung an, welche die Funktion g als Funktion der logischen Variablen z und f umsetzt. Verwenden Sie nur NAND-Gatter mit einer beliebigen Anzahl von Eingängen und Inverter. 2

Summe: 24

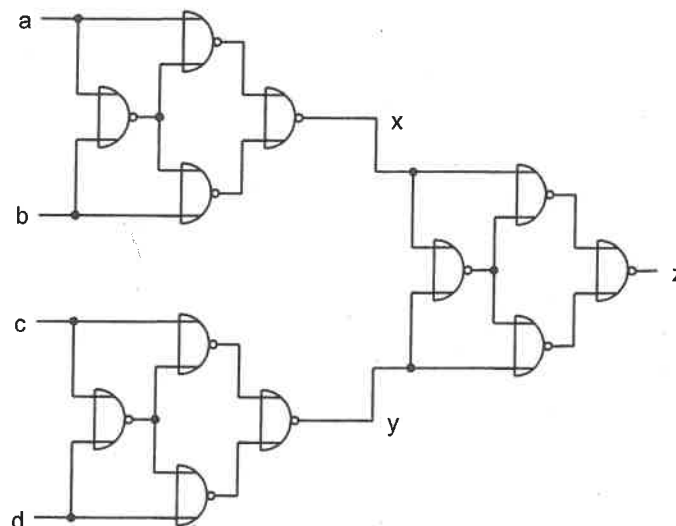


Abbildung 4

Aufgabe 5:

Gegeben ist die in Abbildung 5 gezeigte Stromspiegelschaltung aus vier identischen Bipolar-Transistoren, die ein- und ausgangsseitig jeweils in Darlington-Konfiguration verschaltet sind.

Aufgrund der großen Steilheit von Bipolar-Transistoren können Sie davon ausgehen, dass die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} innerhalb des betrachteten Arbeitsbereiches für alle Transistoren als näherungsweise konstant angesehen wird und etwa 650 mV beträgt. Die Kollektor-Emitter-Spannung $U_{CE,min}$, ab der die Transistoren Stromquellen-Charakter aufweisen, soll etwa 100 mV betragen.

- Welche Spannung stellt sich am Eingang des Stromspiegels (näherungsweise) ein (Formel und Wert)? Geben Sie in der Formel an, welche Spannungsabfälle welcher Transistoren jeweils beitragen. 2
- Wie groß muss die Spannung am Ausgang des Stromspiegels in etwa sein, damit der Ausgang als Stromquelle arbeitet? Geben Sie in der Formel an, welche Spannungsabfälle welcher Transistoren jeweils beitragen. 3
- Berechnen Sie den systematischen relativen Fehler $\varepsilon = (I_{aus} - I_{in}) / I_{in}$ als Funktion der Stromverstärkung β der Transistoren. Vernachlässigen Sie dabei jegliche Abhängigkeit des Kollektorstromes von der jeweiligen Kollektorspannung. 7
Hinweis: Berechnen Sie zunächst Ein- und Ausgangsstrom als Funktion des Stromes I_{B1} , wobei $I_{B1} = I_{B11} = I_{B12}$ und I_{B11} bzw. I_{B12} der Basisstrom des Transistors T_{11} bzw. T_{12} ist. Berechnen Sie daraus dann den relativen Fehler.
 Geben Sie auch eine Näherungsformel an, in der Sie nur die dominanten Terme in Nenner und Zähler berücksichtigen.
- Skizzieren Sie den relativen Fehler ε (Verwendung der Näherungsformel erlaubt, aber nicht notwendig) für $\beta = 50 \dots 200$. 2

Hinweis: Um diese Zeichnung einfach, zügig und quantitativ hinreichend präzise erstellen zu können, wird empfohlen, das Arbeitsblatt zu dieser Aufgabe zu verwenden.

Summe: 14

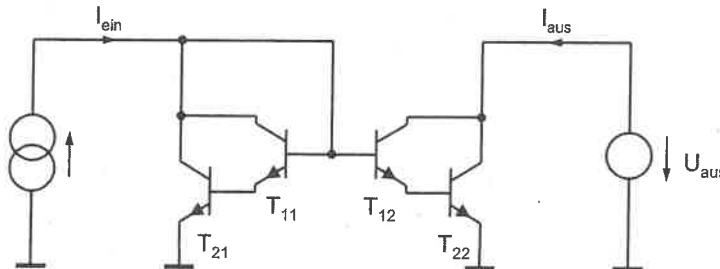
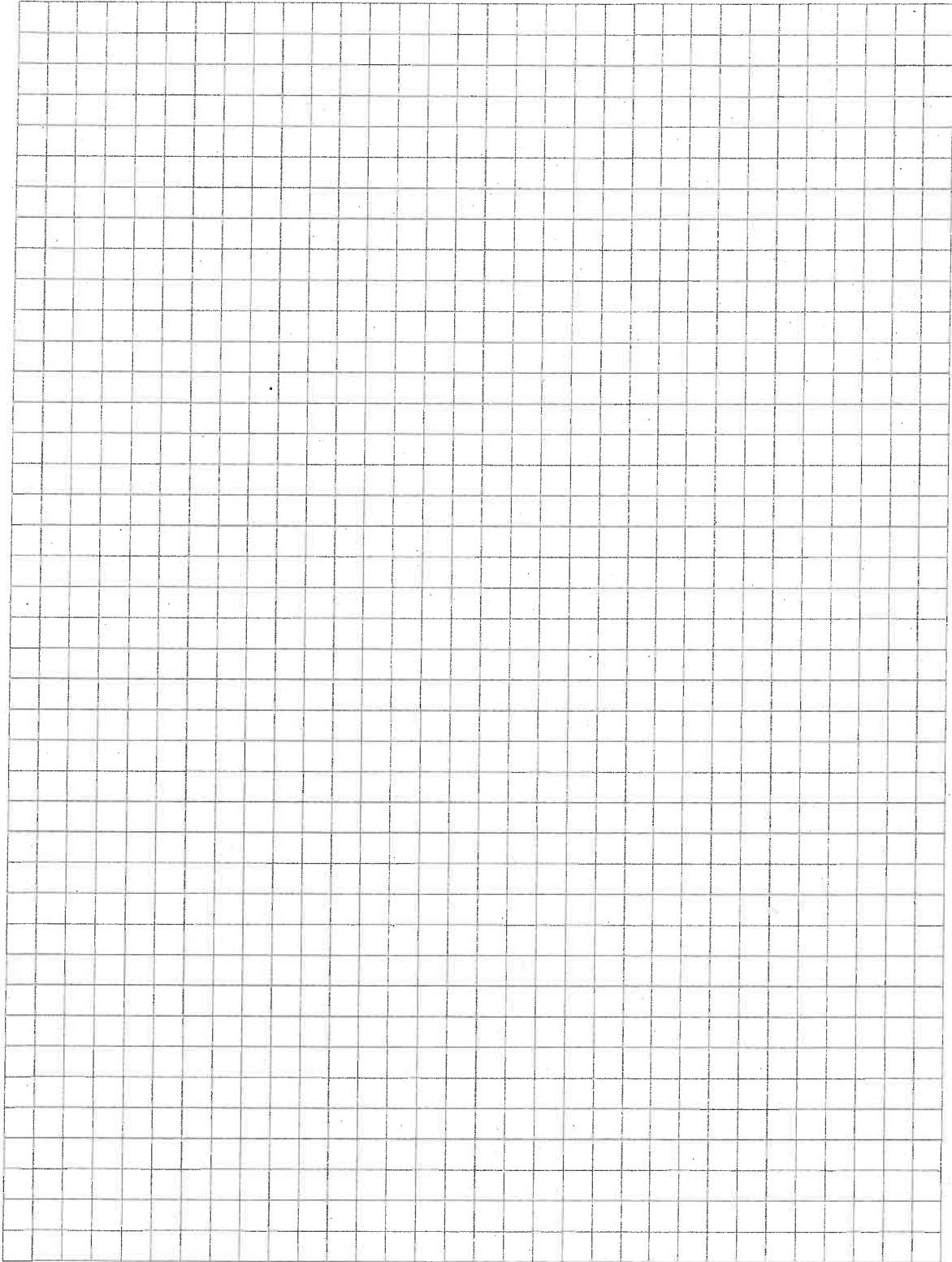
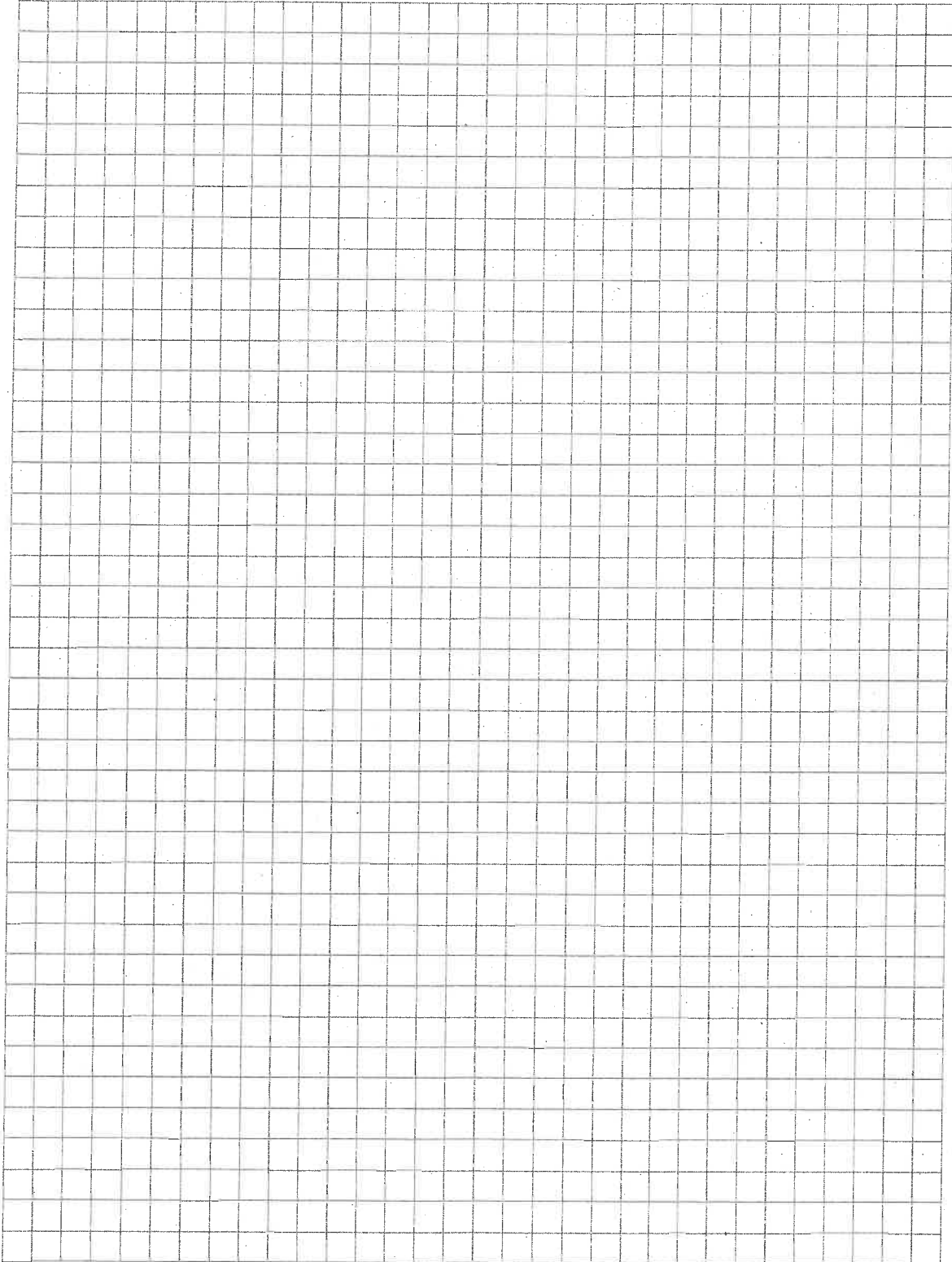


Abbildung 5

| | | |
|------------------------------|----------------|------------|
| Arbeitsblatt zu Aufgabe 2 | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|------------------------------|----------------|------------|



| | | |
|--|----------------|------------|
| Arbeitsblatt zu Aufgabe 2 (Ersatz) | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|--|----------------|------------|



| | | |
|----------------------------------|----------------|------------|
| Arbeitsblatt (1) zu Aufgabe 4 | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|----------------------------------|----------------|------------|

| a | b | c | d | x | y | z |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | | | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | | | |
| 0 | 0 | 1 | 0 | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | | | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | | | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | | | |
| 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | | | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | | | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | | | |

Wahrheitstabelle zu Aufgabe 4 (bitte vervollständigen)

| | | |
|--|----------------|------------|
| Arbeitsblatt (1) zu Aufgabe 4 (Ersatz) | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|--|----------------|------------|

| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | | | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | | | |
| 0 | 0 | 1 | 0 | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | | | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | | | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | | | |
| 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | | | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | | | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | | | |

Wahrheitstabelle zu Aufgabe 4 (bitte vervollständigen)

| | | |
|----------------------------------|----------------|------------|
| Arbeitsblatt (2) zu Aufgabe 4 | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
| | | |

KV-Diagramm 1, Funktion z:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | |
| 0 | 1 | | | | | |

KV-Diagramm 2, Funktion f:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 0 |

KV-Diagramm 3, Funktion g:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | |
| 0 | 1 | | | | | |

| | | |
|--|----------------|------------|
| Arbeitsblatt (2) zu Aufgabe 4 (Ersatz) | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|--|----------------|------------|

KV-Diagramm 1, Funktion z:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | |
| 0 | 1 | | | | | |

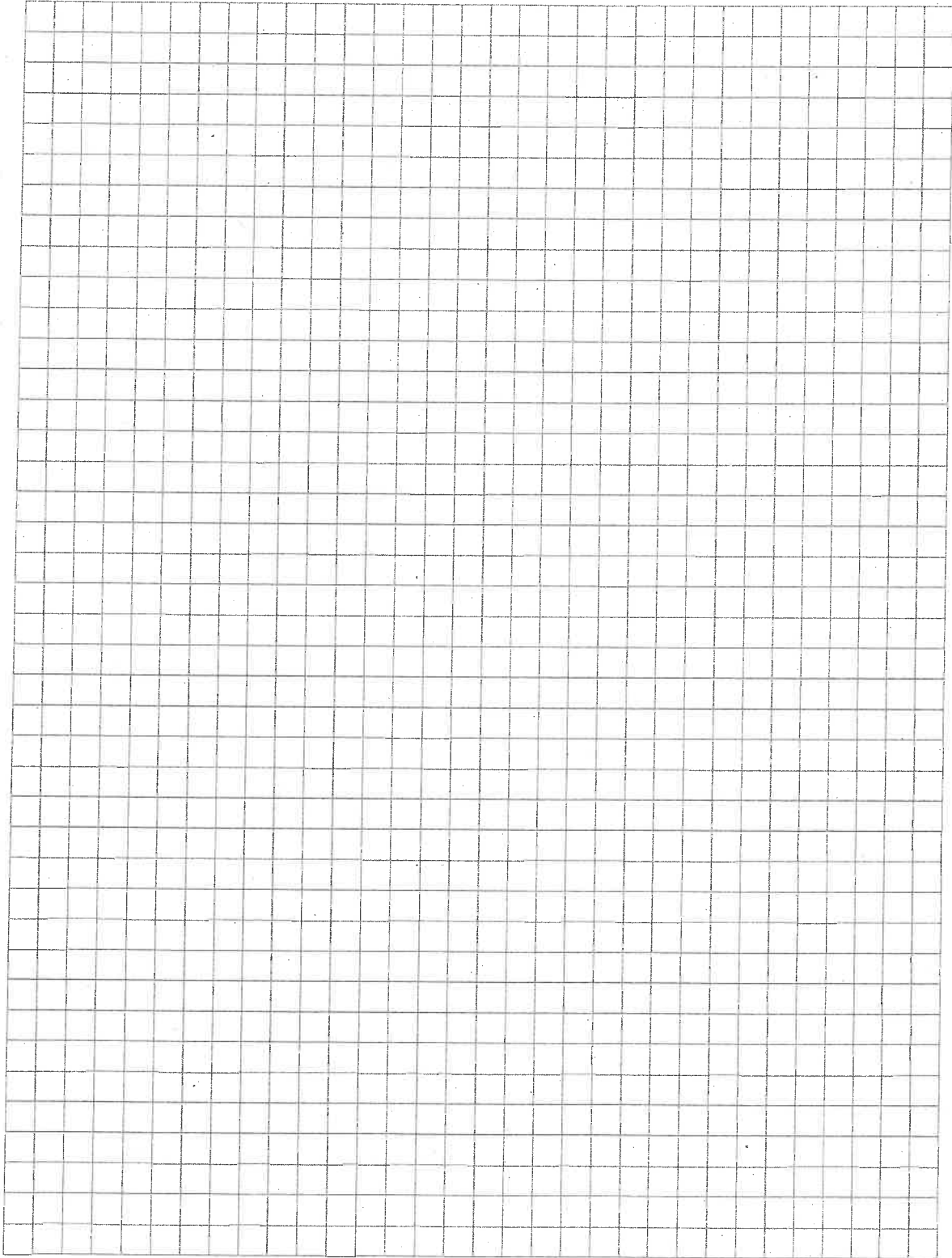
KV-Diagramm 2, Funktion f:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 0 |

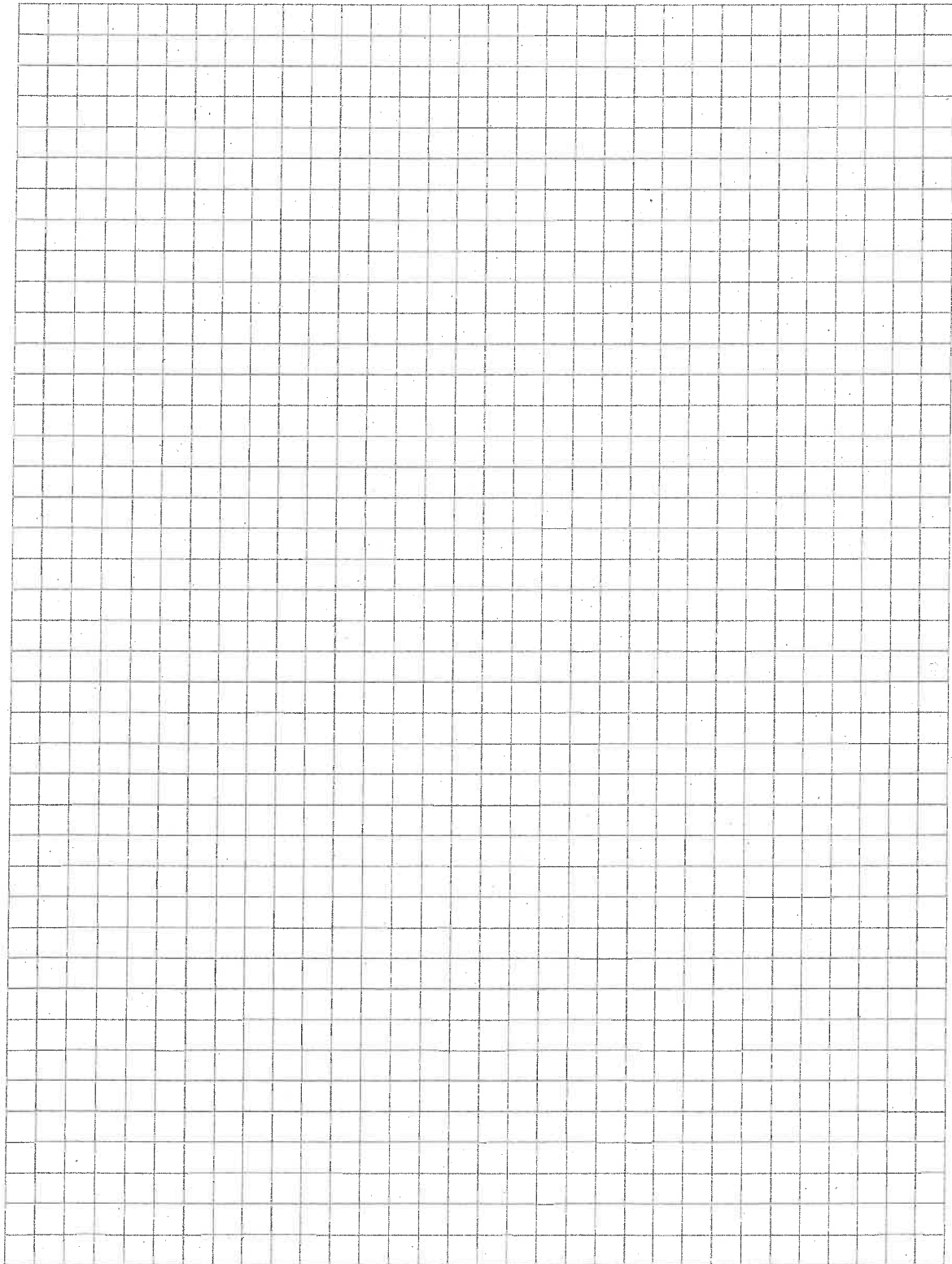
KV-Diagramm 3, Funktion g:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | |
| 0 | 1 | | | | | |

| | | |
|------------------------------|----------------|------------|
| Arbeitsblatt zu Aufgabe 5 | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|------------------------------|----------------|------------|



| | | |
|--|----------------|------------|
| Arbeitsblatt zu Aufgabe 5 (Ersatz) | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|--|----------------|------------|



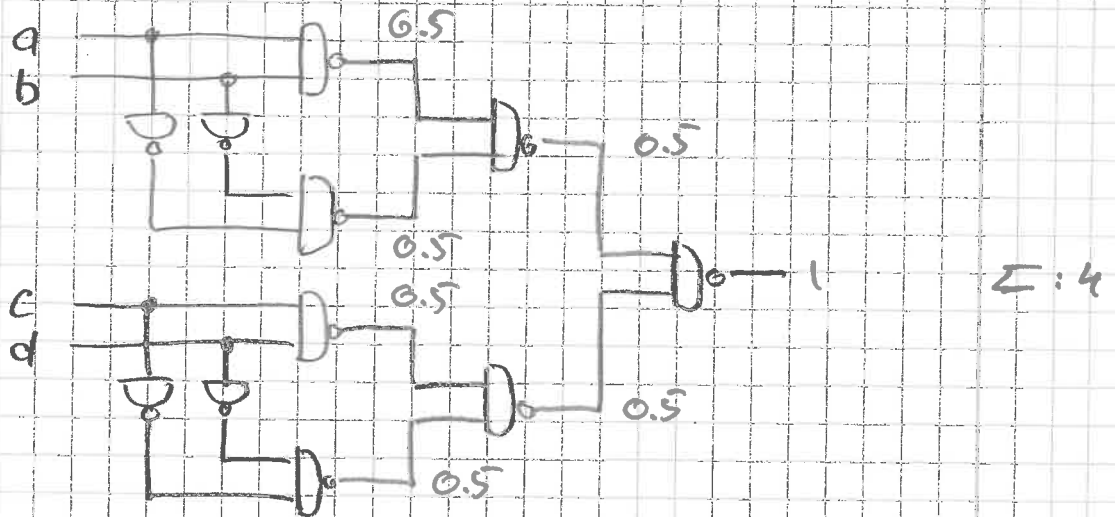
Klausur Schaltungstechnik TU8 29.07.2015
 Musterlösung

zu Aufgabe 1:

$$a) z = \underbrace{\underbrace{(\bar{a} \vee \bar{b})}_{0.5} \wedge \underbrace{(a \vee b)}_{0.5}}_{0.5} \vee \underbrace{\underbrace{(\bar{c} \vee \bar{d})}_{0.5} \wedge \underbrace{(c \vee d)}_{0.5}}_{0.5} \quad \Sigma: 4$$

$$b) z = \underbrace{[(a \wedge b) \wedge (\bar{a} \wedge \bar{b})] \vee [(c \wedge d) \wedge (\bar{c} \wedge \bar{d})]}_1$$

$$= \underbrace{[(a \wedge b) \wedge (\bar{a} \wedge \bar{b})] \wedge [(c \wedge d) \wedge (\bar{c} \wedge \bar{d})]}_2$$



Abzüge bei eindeutig erkennbaren
 Flüchtigkeitsfehlern (1x Inversoren
 vergessen bei Übertrag, 1x Inverter
 vergessen bei Umsetzung Formel
 in Schaltbild) -0.5

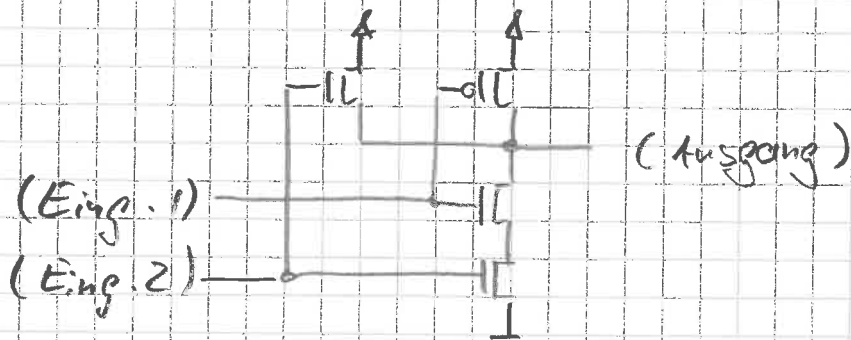
Klausur Schaltungstechnik TUß 29.07.2015

Musterlösung

Zu Aufgabe 1, Fortsetzung:

- c) $4 \times \text{Inverter} \rightarrow 4 \times 2 \text{ Transistoren}$ 0.5
 $7 \times 2\text{-fach NAND} \rightarrow 7 \times 4 \text{ Transistoren}$ 0.5
 $\Rightarrow \text{Anz. Transistoren} = 4 \cdot 2 + 7 \cdot 4 = \underline{\underline{36}}$ 1

d)



$I_{\text{Pull-Down}} \propto k_n \frac{W_n}{2 L_{\text{min}}}$ 1

$I_{\text{Pull-Up, worst-case}} \propto k_p \frac{W_p}{L_{\text{min}}}$ 1

$\Rightarrow k_p \frac{W_p}{L_{\text{min}}} = k_n \frac{W_n}{2 L_{\text{min}}}$

$\Rightarrow W_p = \frac{1}{2} \frac{k_n}{k_p} W_n$

$= W_n$ 1

e) $I_{\text{Pull-Down, worst-case}} \propto k_n \frac{W_n}{2 L_{\text{min}}}$ 1

$I_{\text{Pull-Up, worst-case}} \propto k_p \frac{W_p}{4 L_{\text{min}}}$ 1

$\Rightarrow k_p \frac{W_p}{4 L_{\text{min}}} = k_n \frac{W_n}{2 L_{\text{min}}}$

$\Rightarrow W_p = 4 \frac{k_n}{k_p} W_n = 8 W_n$ 2

Musterlösung

Zu Aufgabe 2:

a) $U_4 = U_1 \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)$ 2

b) $U_5 = U_4$ (wegen virtueller Identität der Eingangsspannungen des OPs) 2

$= U_1 \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)$ (*)

c) $0 = (U_3 - U_5) \frac{1}{R_3} + (U_2 - U_5) \frac{1}{R_2} + (U_{aus} - U_5) \frac{1}{R_5}$ 2

$= \frac{U_3}{R_3} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_{aus}}{R_5} - U_5 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5}\right)$ 1

$\Rightarrow U_{aus} = -U_3 \frac{R_5}{R_3} - U_2 \frac{R_5}{R_2} + U_5 \left(\frac{R_5}{R_2} + \frac{R_5}{R_3} + 1\right)$ 1

$= U_1 \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_5}{R_2} + \frac{R_5}{R_3}\right) - U_2 \frac{R_5}{R_2} - U_3 \frac{R_5}{R_3}$ 1

d) (Für den Fall, dass die Schaltung nicht in Begrenzung geht, gilt:)

$U_{aus} = U_1 (1 + 0.8)(1 + 2 + 2) - 2U_2 - 2U_3$ 0.5

$= 9 U_1 - 2U_2 - 2U_3$ 0.5

Für $U_1 = 1V$ und $U_2 = 3V \Rightarrow$

$U_{aus} = 3V - 2U_3$ 1

\rightarrow Skizze bzw. Arbeitsblatt

* Volle Punktzahl auch dann, wenn dieser Bezug erst wieder (korrekt) in Teil c) aufgegriffen wird
Aufgabe 2 / Seite 1

Musterlösung

zu Aufgabe 2 Fortsetzung:

c) R_6 wird zwischen den Ausgängen der beiden OPs eingefügt.

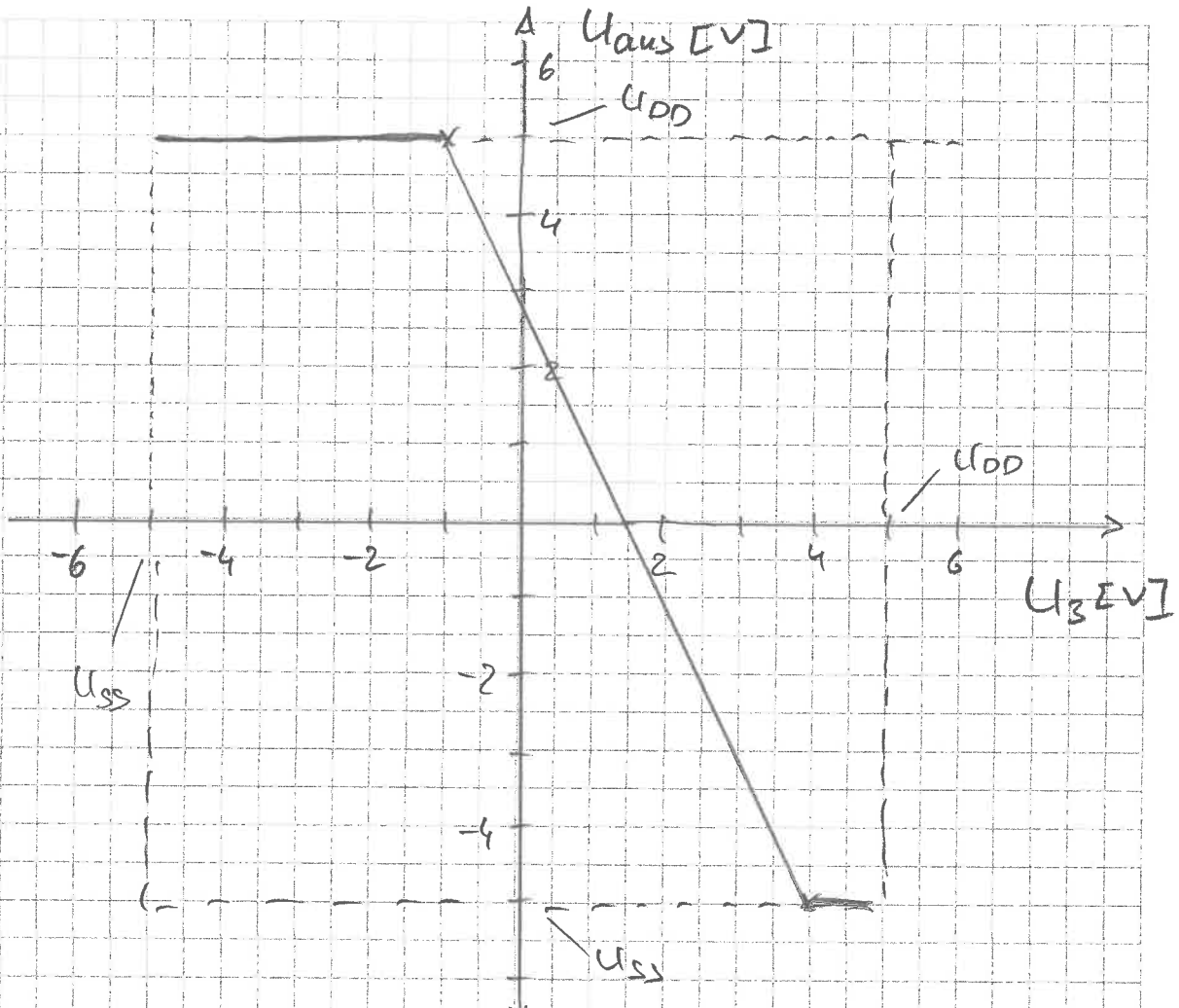
Diese haben Spannungsquellencharakter bzw. sind sehr niederohmig

2

\Rightarrow keine Auswirkung auf U_{aus} als Fkt. (U_1, U_2, U_3)

2*

* nur mit Begründung



Steigung Verlauf

Betrag

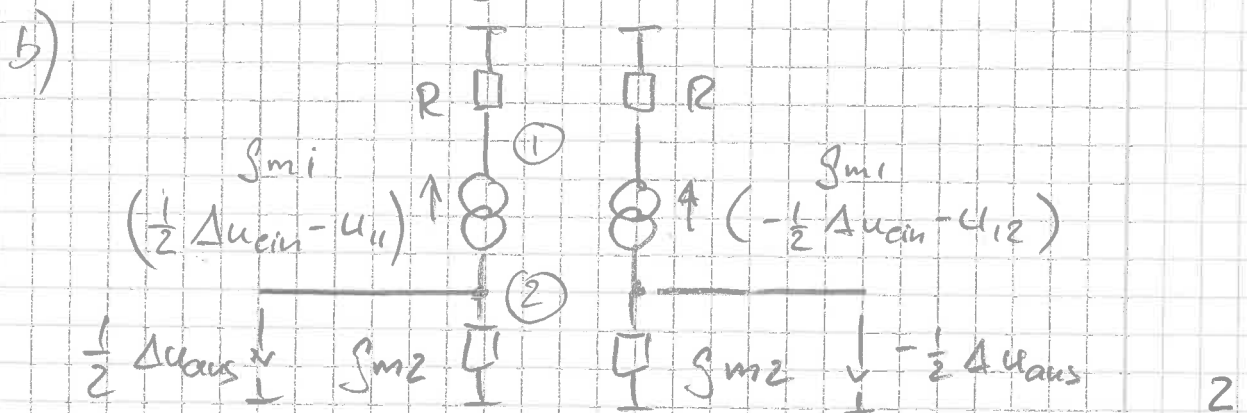
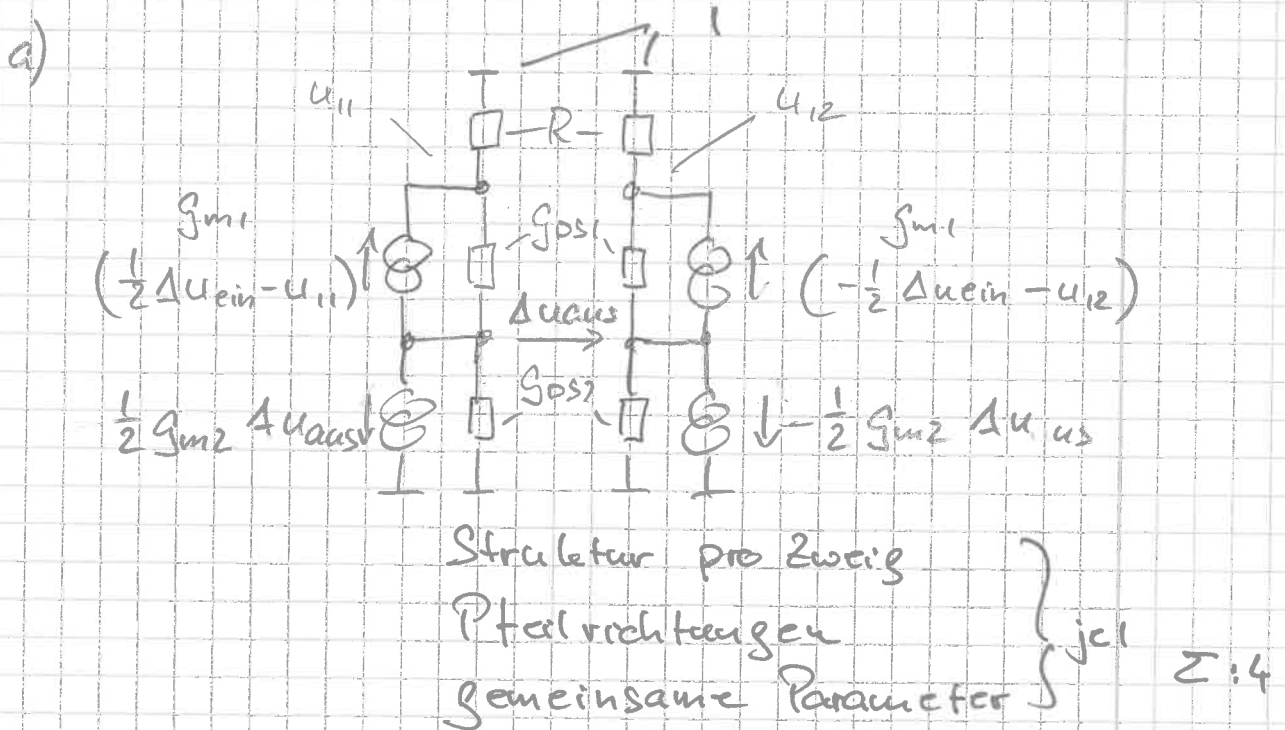
Begrenzung eingez.

Werte

Einzeichnen von U_{00} und U_{ss} ist nicht
gefordert, dient hier nur der Klarheit

Klausur Schaltungstechnik TUB 29.07.2015
 Masterlösung

Zu Aufgabe 3:



Betrachte z.B. nur linken Zweig, führe Knoten ① und ② ein und stelle Knotengleichungen auf:

$$\textcircled{1} \quad 0 = g_{m1} \left(\frac{1}{2} \Delta u_{\text{ein}} - u_{11} \right) - u_{11} \frac{1}{R} \quad 2$$

$$\textcircled{2} \quad 0 = -g_{m1} \left(\frac{1}{2} \Delta u_{\text{ein}} - u_{11} \right) - \frac{1}{2} \Delta u_{\text{aus}} g_{m2} \quad 2$$

Klausur Schaltungstechnik TUB 29.07.2015

Musterlösung

zu Aufgabe 3, Fortsetzung:

$$\text{aus Gl. zu ①} \Rightarrow u_{in} \left(g_{m1} + \frac{1}{R} \right) = g_{m1} \frac{1}{2} \Delta u_{ein}$$

$$\Rightarrow u_{in} = g_{m1} \frac{1}{2} \Delta u_{ein} \frac{1}{g_{m1} + 1/R}$$

Einsetzen in Gl. zu ②

$$0 = -g_{m1} \frac{1}{2} \Delta u_{ein} \left(1 - \frac{g_{m2}}{g_{m1} + 1/R} \right) - \frac{1}{2} \Delta u_{aus} g_{m2}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta u_{aus}}{\Delta u_{ein}} = - \frac{g_{m1}}{g_{m2}} \left(1 - \frac{g_{m2}}{g_{m1} + 1/R} \right) \quad 2$$

c) $\omega_1 = \frac{1}{2} \omega_0$ 1
 $= 36 \mu\text{m} / 2 = 18 \mu\text{m}$ 1

d) $I_1 = \frac{1}{2} \frac{\omega_1}{L_1} k_p V_{eff1}^2$ 1

$g_{m1} = \frac{\omega_1}{L_1} k_p V_{eff1}$ 1

$I_2 = \frac{1}{2} \frac{\omega_2}{L_2} k_p V_{eff2}^2$ 0.5

$g_{m2} = \frac{\omega_2}{L_2} k_p V_{eff2}$ 0.5

$\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = 6$ 1

$\Rightarrow V_{eff1} = 6 V_{eff2} \frac{\omega_2}{L_2} \frac{L_1}{\omega_1}$ 0.5

$I_1 = I_2$ 1

$\Rightarrow V_{eff2}^2 = V_{eff1}^2 \frac{\omega_1}{L_1} \frac{L_2}{\omega_2}$ 0.5

Klausur Schaltungstechnik TuB 29.07.2015
 Musterlösung

zu Aufgabe 3, Fortsetzung:

$$\Rightarrow V_{\text{Geff}2}^2 = 36 V_{\text{Geff}1}^2 \left(\frac{w_2}{L_2}\right)^2 \left(\frac{L_1}{w_1}\right)^2 \frac{w_1}{L_1} \frac{L_2}{w_2}$$

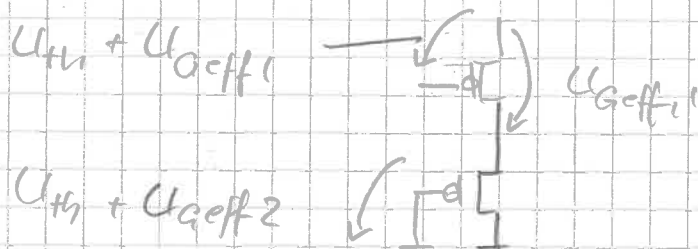
$$\Rightarrow 1 = 36 \frac{w_2}{w_1} \frac{L_1}{L_2}$$

$$\Rightarrow w_2 = \frac{1}{36} w_1 \frac{L_2}{L_1}$$

Mit $w_1 = 18 \mu\text{m}$, $L_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $L_2 = 2.0 \mu\text{m}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow w_2 &= 18 \mu\text{m} \frac{1}{36} \cdot 2.5 \\ &= 1.25 \mu\text{m} \end{aligned}$$

e) Min. Eingangs-Common-Mode-Spg.:



$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{\text{eff}, \text{em}, \text{min}} &= \\ &= U_{\text{in}} + U_{\text{Geff}2} + U_{\text{Geff}1} - (U_{\text{in}} + U_{\text{Geff}1}) \quad 0.5 \\ &= U_{\text{Geff}2} \quad 0.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Wegen } I_2 &= \frac{1}{2} \frac{w_2}{L_2} k_p U_{\text{Geff}2}^2 \\ &= I_1 = \frac{1}{2} \frac{w_1}{L_1} k_p U_{\text{Geff}1}^2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow U_{\text{Geff}2} = U_{\text{Geff}1} \sqrt{\frac{w_1}{L_1} \frac{L_2}{w_2}}$$

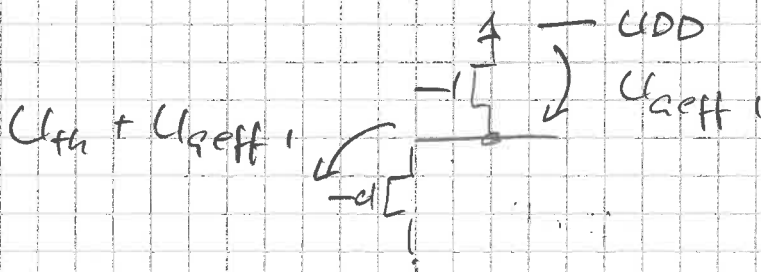
Klausur Schaltungstechnik TUB 29.07.2015
Musterlösung

zur Aufgabe 3, Fortsetzung:

$$\begin{aligned} \dots &= (U_{\text{bias}} - U_{\text{th}}) \sqrt{\frac{L_1 L_2}{L_1 \omega_2}} \\ &= 200 \text{ mV} \sqrt{\frac{18}{0.8} \cdot \frac{2}{1.25}} \\ &= 1.2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow U_{\text{CM,erl,max}} = 1.2 \text{ V}$$

Max. Eingang Common-Mode-Spg.:



$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{\text{CM,erl,max}} &= U_{\text{DD}} - U_{\text{Geff}1} - (U_{\text{Geff}1} + U_{\text{th}}) \\ &= U_{\text{DD}} - U_{\text{th}} - 2U_{\text{Geff}1} \\ &= 3.3 \text{ V} - 640 \text{ mV} - 400 \text{ mV} \\ &= 2.26 \text{ V} \end{aligned}$$

f) An R darf max. die Differenz der oben berechneten $U_{\text{CM,erl}}$ abfallen, damit alle Transistoren in Sättigung bleiben

$$\Rightarrow R_{\text{max}} = (U_{\text{CM,erl,max}} - U_{\text{CM,erl,min}}) / I$$

$$\text{Mit } I = \frac{1}{2} \frac{W_1}{L_1} k_p V_{\text{Geff}1}^2$$

Klausur Schaltungstechnik TU/B 29.07.2015
 Musterlösung

zu Aufgabe 3, Fortsetzung

$$\dots = \frac{1}{2} \frac{18}{0,8} 56 \frac{\mu A}{V^2} (0,2 V)^2$$

$$= 25,2 \mu A$$

0,5

und mit

$$\Delta U_{eff} = U_{eff, ein, max} - U_{eff, ein, min}$$

$$= 2,26 V - 1,2 V$$

$$= 1,06 V$$

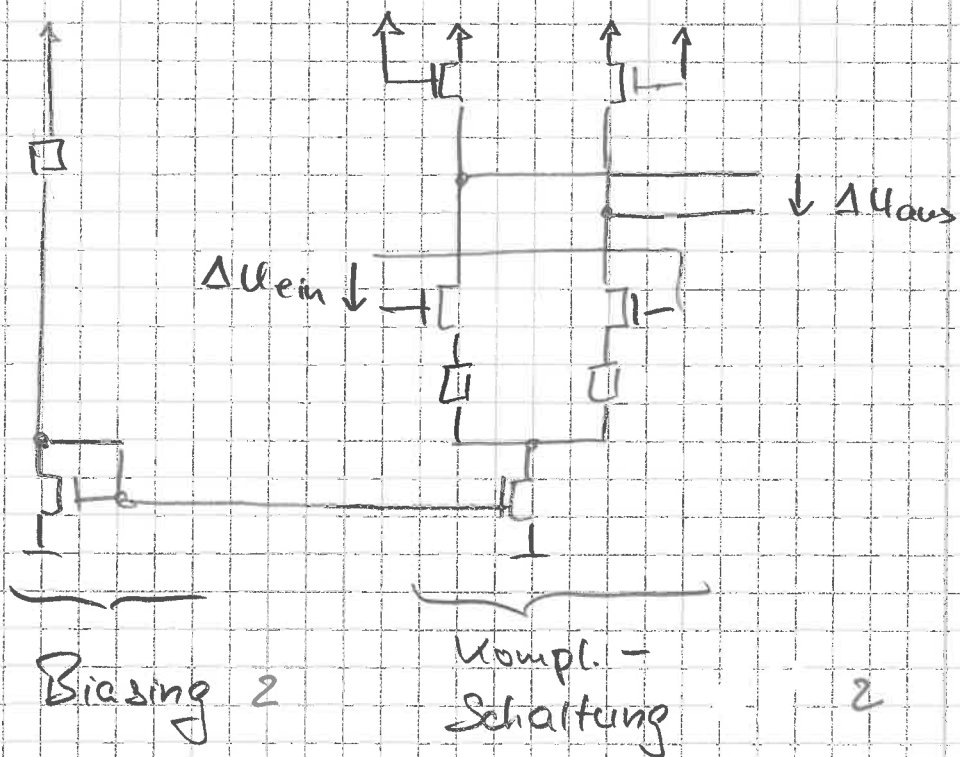
0,5

$$\Rightarrow R_{max} = \frac{1,06 V}{25,2 \mu A}$$

$$\approx 42 k\Omega$$

1

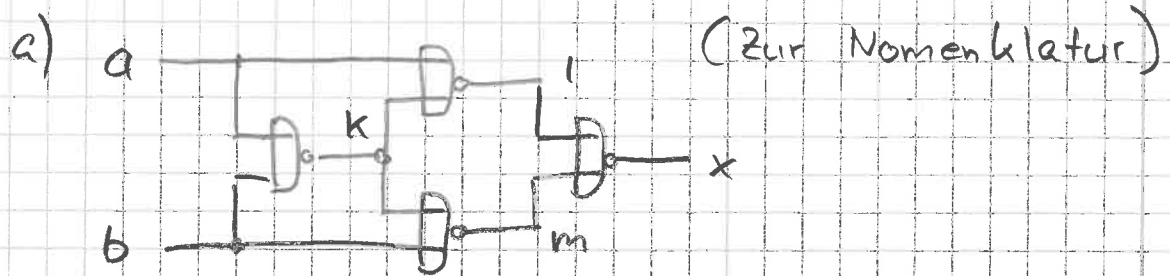
2)



Klausur Schaltungstechnik TU8 29.07.2015

Musterlösung

Zu Aufgabe 4:



$$k = \overline{a \vee b} \quad 1$$

$$l = \overline{(\overline{a \vee b}) \vee a} \quad 1$$

$$= \overline{(\bar{a} \wedge \bar{b}) \vee a}$$

$$= \overline{(\bar{a} \vee a) \wedge (\bar{b} \vee a)} = \overline{\bar{b} \vee a}$$

$$= \bar{a} \wedge b \quad 2$$

$$m = a \wedge \bar{b} \quad 0.5$$

$$x = \overline{(a \wedge \bar{b}) \vee (\bar{a} \wedge b)} \quad 1$$

$$= (a \wedge b) \vee (\bar{a} \wedge \bar{b}) \quad 2$$

$$y = (c \wedge d) \vee (\bar{c} \wedge \bar{d}) \quad 0.5$$

b) S. Arbeitsblatt

c) KV-Diagramme: S. Arbeitsblatt

zu Aufgabe 4, Fortsetzung

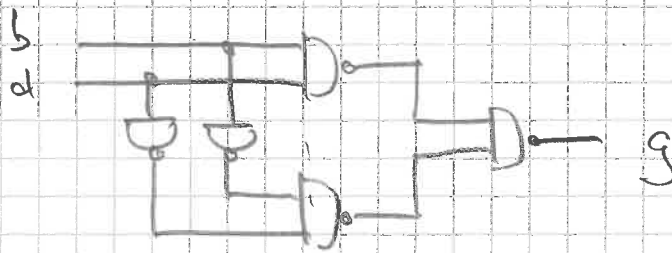
KV-Diagramm:

$$g = (\bar{b} \wedge \bar{d}) \vee (b \wedge d)$$

2

d) $g = \overline{(\bar{b} \wedge \bar{d}) \wedge (b \wedge d)}$

1



1

| | | |
|----------------------------------|----------------|------------|
| Arbeitsblatt (2) zu Aufgabe 4 | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
|----------------------------------|----------------|------------|

| a | b | c | d | x | y | z |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Wahrheitstabelle zu Aufgabe 4 (bitte vervollständigen)

Alles korrekt: 6

pro Fehler : -0.5

Folgefehler berücksichtigen

| | | |
|----------------------------------|----------------|------------|
| Arbeitsblatt (2) zu Aufgabe 4 | Name, Vorname: | Matr.-Nr.: |
| | | |

KV-Diagramm 1, Funktion z:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | | 0 | 1 | 0 | 1 |

Alles korrekt : 4
 1 Fehler : 3.5
 2 Fehler : 3
 3 Fehler : 2
 4 Fehler : 1
 > 4 Fehler : 0

KV-Diagramm 2, Funktion f:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 0 |

Folgefehler
berücksichtigen

KV-Diagramm 3, Funktion g:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | b | 0 | 0 | 1 | 1 |
| c | d | | | | | |
| 0 | 0 | | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | | 0 | 0 | 1 | 1 |

Punkte:
 Alles korrekt : 2
 pro Fehler : -0.5

FF berücksichtigen

Klausur Schaltungstechnik TUß 29.07.2015

Musterlösung

zu Aufgabe 5:

$$\begin{aligned}
 a) \quad U_{em} &\approx U_{BE11} + U_{BE21} && (\\
 & \quad \quad \quad (\text{bzw. } U_{BE12} + U_{BE22}) \\
 &= 2 \cdot 650 \text{ mV} \\
 &= 1.3 \text{ V} && (
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b) \quad U_{aus, min} &\approx U_{BE22} + U_{CE, min, 12} && 2 \\
 &= 650 \text{ mV} + 100 \text{ mV} \\
 &= 750 \text{ mV} && (
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c) \quad I_{em} &= 2 I_{BE1} + \beta I_{BE1} + \beta(\beta+1) I_{BE1} && \\
 &= [\beta^2 + 2\beta + 2] I_{BE1} && 2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{aus} &= \beta I_{BE1} + \beta(\beta+1) I_{BE1} && \\
 &= [\beta^2 + 2\beta] I_{BE1} && 2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= \frac{(\beta^2 + 2\beta) I_{BE1} - (\beta^2 + 2\beta + 2) I_{BE1}}{(\beta^2 + 2\beta + 2) I_{BE1}} && (
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2} && (
 \end{aligned}$$

$$\approx -2/\beta^2 && ($$

d) Wertetabelle (nicht unbedingt erforderlich)

| β | 50 | 100 | 150 | 200 |
|---------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| ε | $-8 \cdot 10^{-4}$ | $-2 \cdot 10^{-4}$ | $-8.9 \cdot 10^{-5}$ | $-5 \cdot 10^{-5}$ |

