

Versuch 1: CMOS-Logik

Einführung

Der Versuch besteht aus zwei voneinander unabhängigen Teilen:

1 CMOS Welt.

2 CHAOS in der IC-Fabrik.

Teil 2 ist fakultativ, gibt aber Bonuspunkte. Das Lösungsblatt zum Versuch erhalten Sie am Praktikumsnachmittag.

→ **B** ist immer ein Hinweis auf Fragen auf dem Lösungsblatt.

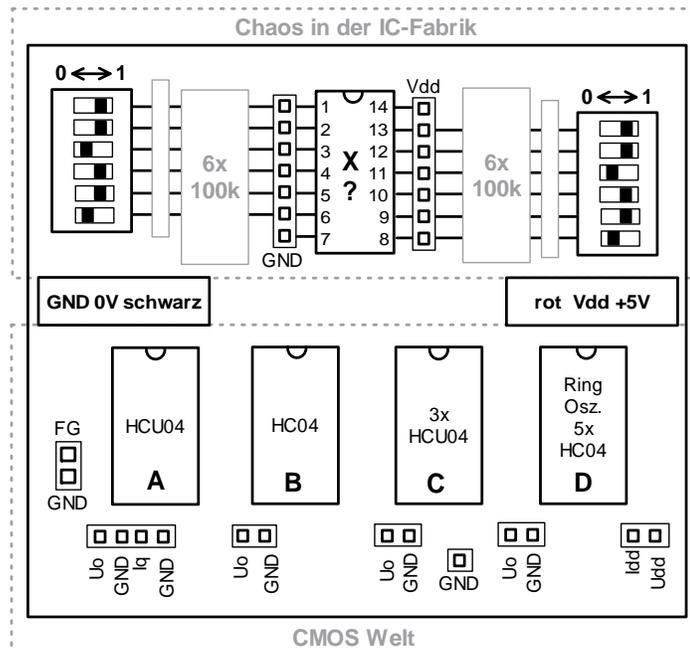
Personen bezogene Ausdrücke wie Student, Teilnehmer etc. stehen in diesem Dokument immer für die weibliche und männliche Form.

In diesem Versuch benützen wir **4 standard Laborgeräte**: Speisegerät, Digital-Multimeter, Funktionsgenerator und Oszilloskop (KO). Wer diese noch nicht kennt oder damit umgehen kann, findet **Beschreibung und Anleitung** online unter:

<http://www.ife.ee.ethz.ch/~zinniker/digiprakt/geraete>

Auf der Digiprakt Seite finden Sie auch noch die alte Beschreibung der Geräte unter *Download >Geräte* als pdf zum herunterladen.

Alle für den Versuch benötigten Schaltungen sind auf einer Leiterplatte (Print) vorbereitet. Das Bild zeigt den Aufbau. Die Schaltungen für den 1. Teil (CMOS) befinden sich in der unteren Hälfte des Prints, diejenigen für den zweiten Teil (Chaos) im oberen Teil. In der Mitte sind die Anschlüsse für die Speisung: 4mm Bananbuchsen: links GND 0V (schwarz); rechts Vdd +5V (rot).



Print mit den Testschaltungen für den Versuch 1.

Vorbereitung am Praktikumsnachmittag für beide Teile:

1. Am Labornetzgerät (PS503A) die positive Speisespannung (+ VOLTS) auf 5V einstellen (dual tracking Modus ausgeschaltet = Drehknopf VOLTS Mitte oben nicht herausgezogen), Kontrolle mit dem Multimeter, Strombegrenzung (Current Limit) auf etwa 10% einstellen.

2. Netzgerät Ausgang ausschalten (Taste OUTPUT oben rechts in Stellung OFF).
3. Print mit zwei Bananenstecker - Laborkabeln am Netzgerät anschliessen.

1 CMOS Welt

Einführung

Die **CMOS – Technologie** ist in der Digitaltechnik zur Zeit **absolut dominierend**. Es ist deshalb sinnvoll, sich deren elementare Charakteristiken einzuprägen. Dieser Versuch soll dazu beitragen, er ist **obligatorisch!**

CMOS Inverter:

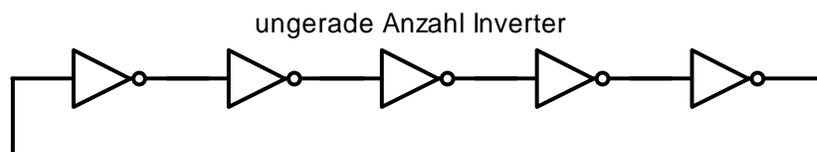
Im ersten Teil wird der Verlauf von Übertragungskennlinie (Transferkennlinie) und Querstrom am CMOS Inverter untersucht.

Die Übertragungskennlinie beschreibt den analogen Zusammenhang zwischen Eingangsspannung U_i und Ausgangsspannung U_o . Sie ist im Idealfall aus drei Geraden zusammengesetzt: für $0 < U_i < U_T$ ist $U_o = U_{dd}$, für $U_T < U_i < U_{dd}$ ist $U_o = 0$ (für den Inverter). Die Ausgangsspannung wechselt beim Durchschreiten der Transferspannung U_T schlagartig zwischen U_{dd} und 0. Die Transferspannung beträgt $U_{dd}/2$. Praktisch kann die Übertragungskennlinie auch abgerundet verlaufen (Lehrbuch Beuth S.173) und die Transferspannung von $U_{dd}/2$ abweichen.

Im Übergangsbereich, zwischen 0 und 1, fließt ein Querstrom durch den Inverter weil beide Transistoren, sowohl der n-Kanal FET als auch der p-Kanal FET (Vorlesung 'CMOS-Inverter'), leiten.

Ringoszillator:

Im zweiten Teil wird ein aus fünf Invertern aufgebauter Ringoszillator ausgemessen. Dabei zeigt sich der fundamentale Zusammenhang zwischen Betriebsspannung, Leistungsverbrauch und Geschwindigkeit. Wegen seiner Einfachheit wird bei der Entwicklung neuer Prozesse für die IC-Herstellung praktisch immer als erste Schaltung ein Ringoszillator hergestellt. Das folgende Bild zeigt die Schaltung des Ringoszillators.



Schaltung des Ringoszillators.

Ein Ringoszillator besteht aus einer **Kette mit ungerader Anzahl Inverter**. Der Ausgang des letzten Inverters ist wieder mit dem Eingang des ersten verbunden. Dies ergibt einen **Rechteckoszillator**, dessen Schwingfrequenz durch die Verzögerungszeit der Inverter bestimmt wird.

Der **Leistungsverbrauch** digitaler CMOS-Schaltungen kann durch eine Kapazität charakterisiert werden. Diese wird als **Cpd = power dissipation capacity** bezeichnet.

net. Sie setzt sich zusammen aus den Gate Kapazitäten der Transistoren und diversen internen Schaltungs- bzw. Leitungs- Kapazitäten. Auch der **Querstrom** kann mit einem Kapazitätsanteil berücksichtigt werden. Kapazitäten müssen nur beim Umschalten umgeladen werden, auch der Querstrom fließt nur beim Umschalten. Damit wird der Leistungsverbrauch P_v proportional zur Schalzhäufigkeit (Schaltfrequenz f). Es gilt (ohne Herleitung):

$$P_v = U_{dd} I_{dd} = U_{dd}^2 C_{pd} f$$

Im Versuch wird aus U_{dd} , I_{dd} und f die Kapazität C_{pd} für eine Reihe von Speisespannungen berechnet.

Aufgaben

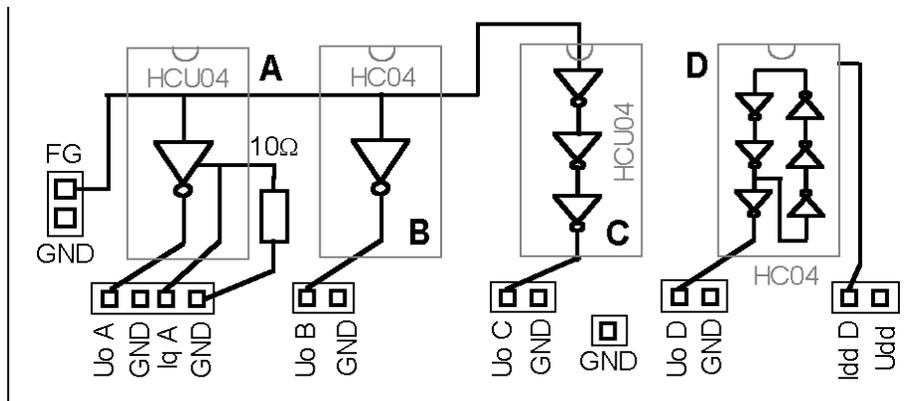
Vorbereitung auf den Praktikumsnachmittag:

Überlegen Sie wie der Ringoszillator funktioniert. In der ganzen Schaltung treten ausschliesslich digitale Signale auf (rechteckförmig zwischen GND und V_{dd}).

1. Wie wird die **Verzögerungszeit t_{pd1}** eines Inverters aus der Periode T der Schwingung berechnet? (Alle Inverter haben die gleiche Verzögerung).
2. Wie wird der **Betriebsstrom I_{dd1}** eines Inverters aus dem Betriebsstrom I_{dd} des ganzen ICs berechnet (nur dieser kann gemessen werden, Schaltung D im folgenden Bild oder im Schema im Anhang beachten)?

Experimentell zu lösende Aufgaben am Praktikumsnachmittag:

Die untere Hälfte des Versuchsprints (CB2) auf Ihrem Arbeitsplatz enthält alle benötigten Schaltungen. Die folgende Figur zeigt die Anordnung der Anschlüsse für die Signale und den Aufbau der Versuchsschaltungen A, B, C und D. Ein vollständiges Schaltschema finden Sie im Anhang.



Versuchsschaltung Teil 1 CMOS Welt auf dem unteren Teil des Versuchsprints

Vorbereitung:

Speisespannung (+5V) am bereits angeschlossenen Netzgerät einschalten.

Achtung: Falsche Polarität oder zu hohe Speisespannung zerstört die ICs!
(Eine Zenerdiode auf dem Print schützt im Notfall vor beiden Fehlern)

Den Ausgang des Funktionsgenerators (Abkürzung FG) über ein T-Stück mit einem BNC-Laborkabel (schwarzes Koaxialkabel mit Überwurf- Drehsteckern) an den Kanal 1 des KO anschliessen.

Am Ausgang des Funktionsgenerators ein dreieckförmiges Ausgangssignal zwischen 0V und +5V und einer Frequenz von ca 2kHz einstellen.

Den Funktionsgenerator zusätzlich (2. Ausgang des T-Stücks) über ein BNC - Stiftbuchsen Laborkabel mit dem FG - Eingang der Testschaltung verbinden (2 Stifte linke Printseite, Kabel Abschirmung (schwarz) an GND, Leiter (rot) an FG. Dieses Signal (Dreieck zwischen 0 und +5V) wird auf dem Print als U_i an Invertereingänge der Versuchsschaltungen A, B und C geführt.

Hinweise zu Anschluss und Einstellung der Geräte finden Sie online unter *Hinweise Versuch 1!* Für ungeübte ist speziell die Einstellung des FG schwierig.

Aufgaben CMOS Inverter:

3. Stellen Sie die **Übertragungskennlinie** ($U_o = f(U_i)$) eines **Inverters 74HCU04** im XY Modus auf dem KO dar (Versuchsschaltung A links auf dem Print). → **B**

U_i ist bereits am Kanal 1 (X) am KO angeschlossen, U_o ganz links auf der vierpoligen Stiftleiste links unten auf dem Print abnehmen: Kanal 2 des KO über ein zweites BNC - Stiftbuchsen Laborkabel mit den Stiften U_o A und GND verbinden.

KO im XY Modus verwenden, Empfindlichkeit und Position für die Kanäle 1 (X) und 2 (Y) so einstellen bis die Übertragungs Kennlinie schön dargestellt wird.
4. Zeichnen Sie den **Kennlinienverlauf** auf dem Lösungsblatt ein. → **B**
5. Stellen Sie den **Verlauf des Querstromes** I_q des gleichen Inverters (74HCU04) in Funktion der Eingangsspannung U_i im XY Modus auf dem KO dar (Versuchsschaltung A links auf dem Print).

Eingang KO Kanal 2 auf den Stift I_q A unterhalb des ICs A umstecken.

Der Querstrom wird als Spannungsabfall über dem kleinen Messwiderstand (10 Ohm) zwischen Masseanschluss (V_{ss}) des ICs und GND gemessen. Über diesen Widerstand fliesst der gesamte Betriebsstrom der Schaltung A.

Empfindlichkeit des Kanals 2 auf dem KO so anpassen, dass der Querstromverlauf schön dargestellt wird.
6. Zeichnen Sie den **Querstrom Verlauf** auf dem Lösungsblatt ein. → **B**
7. Messen Sie auf dem KO den **Querstrom Spitzenwert** (mittels Cursor oder nach Skala).
8. Stellen Sie die **Übertragungskennlinie** ($U_o = f(U_i)$) eines Inverters **74HC04** im XY Modus auf dem KO dar (Versuchsschaltung B).
9. Zeichnen Sie den Verlauf der Kennlinie auf dem Lösungsblatt ein. → **B**
10. Stellen Sie die **Übertragungskennlinie** von **3 Invertern 74HCU04** (hintereinander in Serie geschaltet, $U_o = f(U_i)$) im XY Modus auf dem KO dar (Versuchsschaltung C).
11. Zeichnen Sie den Verlauf der Kennlinie auf dem Lösungsblatt ein. → **B**

12. **Vergleichen** Sie diese **Übertragungskennlinie** mit derjenigen eines Inverters 74HC04. Was fällt Ihnen dabei auf und was schliessen Sie daraus? → B

Aufgaben Ringoszillator:

Der Ringoszillator ist ganz rechts auf dem Print aufgebaut (Schaltung D). Der sechste Inverter dient zu Auskopplung des Signals aus dem Oszillator. Dadurch wird verhindert, dass der Oszillatorkreis durch die Messung der Schwingfrequenz mit dem KO belastet wird.

13. Messen Sie **Schwingfrequenz f_o und Betriebsstrom I_{dd}** des Ringoszillators in der Versuchsschaltung D für folgende Betriebsspannungen: $U_{dd} = 3V, 2V, 1.5V, 1V$. Die Messwerte in der Tabelle auf dem Lösungsblatt eintragen. → B

KO Kanal 1 mit einem **10:1 Tastkopf** an Uo D anschliessen (Achtung, es muss der Tastkopf verwendet werden, ein Laborkabel würde den Ausgang zu stark belasten und zu falschen Messwerten führen!). Tastkopf Masse (kurzes Kabel mit Krokodilklemme) an den einzelnen GND-Pin auf dem Print anschliessen.

Multimeter Anschluss LOW Mitte (schwarz) mit einem Bananen-Laborkabel an den + Ausgang des Speisegerätes anschliessen. Den Anschluss mA (links, blau) mit einem Bananen – Stiftbuchse Laborkabel an den Speisungsstift I_{dd} D auf dem Print verbinden. KO Kanal 2 zur Messung der Betriebsspannung über einen BNC-Bananen-Adaptor und ein Bananen-Laborkabel ebenfalls mit dem mA Anschluss des Multimeters verbinden. (Für Messung mit Multimeter den V-Anschluss rechts mit 0V verbinden).

KO in den normalen **YT Modus** schalten mit **Triggerung auf Kanal 1** (das Ausgangssignal des Ringoszillators).

14. Berechnen Sie für alle U_{dd} die **Verlustleistungskapazität C_{pd1}** eines Inverters. Tragen Sie die Werte in der Tabelle auf dem Lösungsblatt ein. → B
Erklären und Vergleichen Sie die gefundenen Werte. → B

2 Chaos in der IC-Fabrik

Fakultative Aufgabe, bringt Bonuspunkte und macht viel Spass!

Am frühen Morgen sah im IC-Finishing alles so schön aus: nur einfachste Standard-Logik-ICs in 14-Pin DIP Gehäuse zu vergiessen, mit der Typenbezeichnung zu bedrucken und in Stangen zu verpacken; - im Zeitalter der hochintegrierten Schaltungen in x-Gehäusetypen mit bis zu 1000 Anschlüssen ein Ferientag!

Nach dem Einrichten der Automaten trifft man sich denn auch vor der Fabrik zu einem improvisierten Herbstfest, - bis gegen Mittag eine Raumpflegerin mit der Hiobsbotschaft einfällt "**Neiau! da drin schmeissts alles weg!**"

Tatsächlich, der Beschriftungsautomat streikt! Die gesamte Produktion liegt wild durcheinander im Ausschusscontainer! Was jetzt, alles in die Entsorgung? "Nein, daraus machen wir Geschenkpakete für Schulen und Universitäten, die können sicher noch etwas damit anfangen!".

Ja, können wir: Es ist Ihre Aufgabe herauszufinden was in den einzelnen ICs für Tore drin sind!

Einführung

Auf Ihrem Arbeitsplatz finden Sie 3 ICs ohne Typenbezeichnung. Es ist zu bestimmen, welche Art von Toren in den einzelnen ICs drin sind. In Frage kommen elementare Tore mit zwei- und drei Eingängen in verschiedenen Anordnungen (Pin-Belegungen, Layouts) im IC. Alle Tore in einem IC sind identisch.

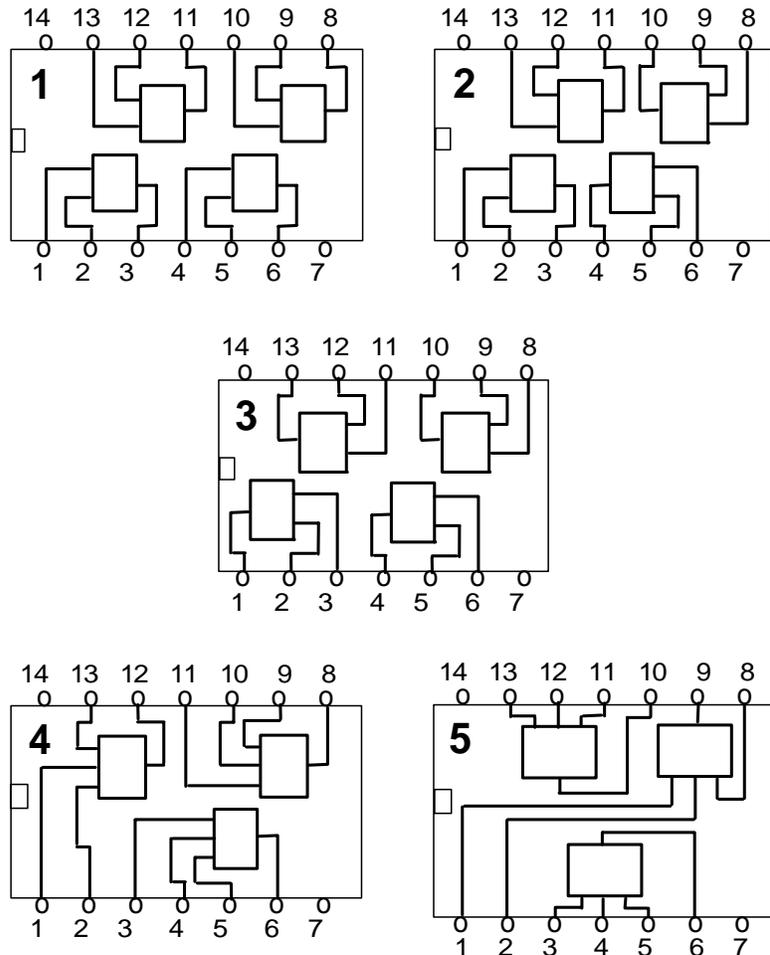
Für Tore mit **2 Eingängen** kommen die folgenden Typen in Frage:

AND, OR, NAND, NOR, EXOR

Für Tore mit **3 Eingängen** kommen in Frage:

AND, OR, NAND, NOR

Die Tore können im IC **auf 5 verschiedene Arten angeordnet** sein (3 für Tore mit 2 Eingängen, 2 für Tore mit 3 Eingängen). Das folgende Bild zeigt alle 5 möglichen Anordnungen. Der nicht belegte Pin 7 ist jeweils der Masse Anschluss (GND, VSS, 0V) aller Tore, Pin 14 der Anschluss für die Speisespannung (Vdd, +5V).



Figur 1: Mögliche Anordnungen der Tore im IC. 1, 2 und 3 für Tore mit zwei Eingängen, 4 und 5 für Tore mit drei Eingängen. Pin 7 = 0V, 14 = +5V.

Vorbereitung auf den Praktikumsnachmittag:

15. Überlegen Sie wie in der Testschaltung bestimmt werden kann, ob an einem Pin ein **Ausgang oder Eingang** eines Tores angeschlossen ist (Schaltschema der Testschaltung im nächsten Bild beachten).
16. Überlegen Sie wie mit möglichst wenigen Messungen die in einem IC vorhandene **Anordnung der Tore** bestimmt werden kann (Flussdiagramm für das Vorgehen aufzeichnen). Wie gross ist die maximal notwendige Anzahl Messungen? → **B**
- Tip für das Vorgehen: Für jede Anordnung in einer Tabelle (Zeilen = Anordnungen, Kolonnen = Pins) die Lage der Ausgänge eintragen. Daraus ist leichter als aus der Figur ersichtlich, ob es Pins gibt die nur bei einer Anordnung an einem Ausgang angeschlossen sind.
17. Überlegen Sie wie nach gefundener Anordnung die **Art der Tore** im IC bestimmt werden kann (alle Tore in einem IC sind identisch). Beschreiben Sie Ihr Vorgehen wieder mit einem Flussdiagramm. Es sollen möglichst wenige Messungen notwendig sein. Wie gross ist die maximal notwendige Anzahl Messungen? → **B**

Achtung: Für die Aufgaben 16. und 17 gilt jedes Ablesen eines Messwertes als **eine** Messung.

Experimentell zu lösende Aufgaben am Praktikumsnachmittag:

Zur Lösung der Aufgabe dient die Testschaltung auf dem oberen Teil des Versuchsprints. Sie ist im nächsten Bild dargestellt.

Auf dem Arbeitsplatz finden Sie **3 ICs ohne Typenbezeichnung** bzw. mit einer Etikette überklebt ist. Diese trägt nur einen Codebuchstaben. Die ICs müssen zur Lösung der Aufgabe nacheinander in den Testsockel (DUT = Device Under Test) oben in der Mitte des Versuchsprints eingesteckt werden.

ICs vorsichtig in den Testsockel einstecken, möglichst parallel ohne Pins zu verbiegen. Unbedingt auf **richtige Orientierung** achten: Pin 1 ist mit einem Punkt gekennzeichnet, die Schmalseite zwischen Pin 1 und 14 auch am IC-Sockel mit einer Kerbe. Pin 1 liegt am oberen Rand des Prints. Unbedingt einen **Assistenten um Hilfe bitten** wenn sie noch nie einen IC in einen Sockel gesteckt haben!

Achtung: Falsche Orientierung der ICs im Sockel zerstört diese!
Zum Einstecken und Herausnehmen die Speisung abschalten.

ICs auch vorsichtig aus dem Testsockel entfernen, möglichst parallel ohne Pins zu verbiegen: Einen Schraubenzieher zwischen Sockel und IC schieben und den IC mit Gefühl herausstemmen oder die **Ausziehzange verwenden**.

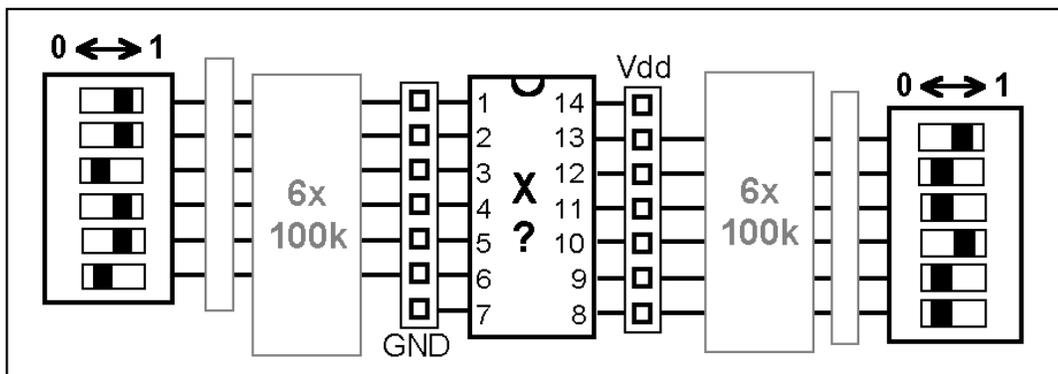
Jeder IC Signal Pin (1-6, 8-13) ist mit einem Widerstand (100k Ω) beschaltet der über einen Schalter entweder mit 0V (GND, L, 0) oder +5V (Vdd, H, 1) verbunden werden kann. Mit den 6-fachen Schiebeschaltern auf beiden Seiten wird in der Schalterstellung ON (Schaltknocken nach rechts geschoben) der zugehörige

Widerstand auf 1 (+5V) geschaltet, in der linken Stellung (Schalter offen) über einen pull-down Widerstand (4.7kΩ) auf 0 (0V) gezogen.

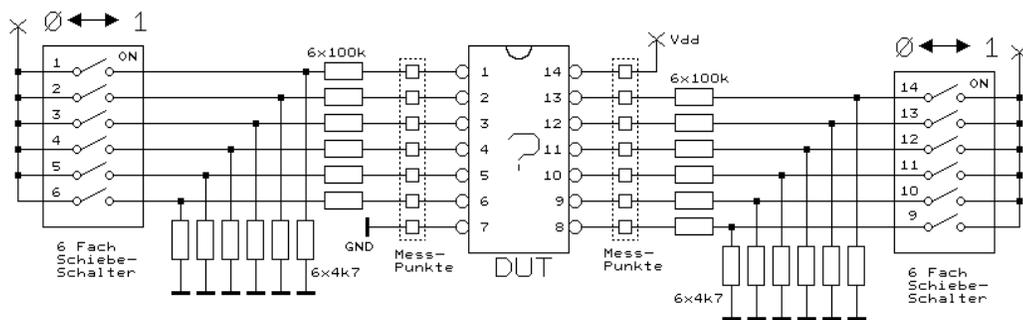
Die Schalter können mit einem Kugelschreiber oder Schraubenzieher betätigt werden. Die Spannung an den Pins kann entweder mit dem Multimeter oder dem KO jeweils über ein Laborkabel mit Stiftbuchse gemessen werden. Die Speisung der ICs mit 5V erfolgt aus dem Netzgerät.

Achtung: Wenn Sie versuchen die Etikette vom IC abzulösen (um darunter die Originalbezeichnung zu finden) so verderben Sie sich nicht nur den Spass an der Aufgabe, Sie bekommen dafür auch noch 0 Punkte für die ganze Teilaufgabe 2.

Achtung: Falsche Polarität oder zu hohe Speisespannung zerstört die ICs!



a) Anordnung der Testschaltung auf dem Versuchsprint



b) Schaltschema der Testschaltung

Testschaltung Teil 2 Chaos in der IC-Fabrik

Achtung: Zuordnung von IC-Pins zu Schaltern genau beachten (links und rechts sind um je 1 Pin versetzt!)

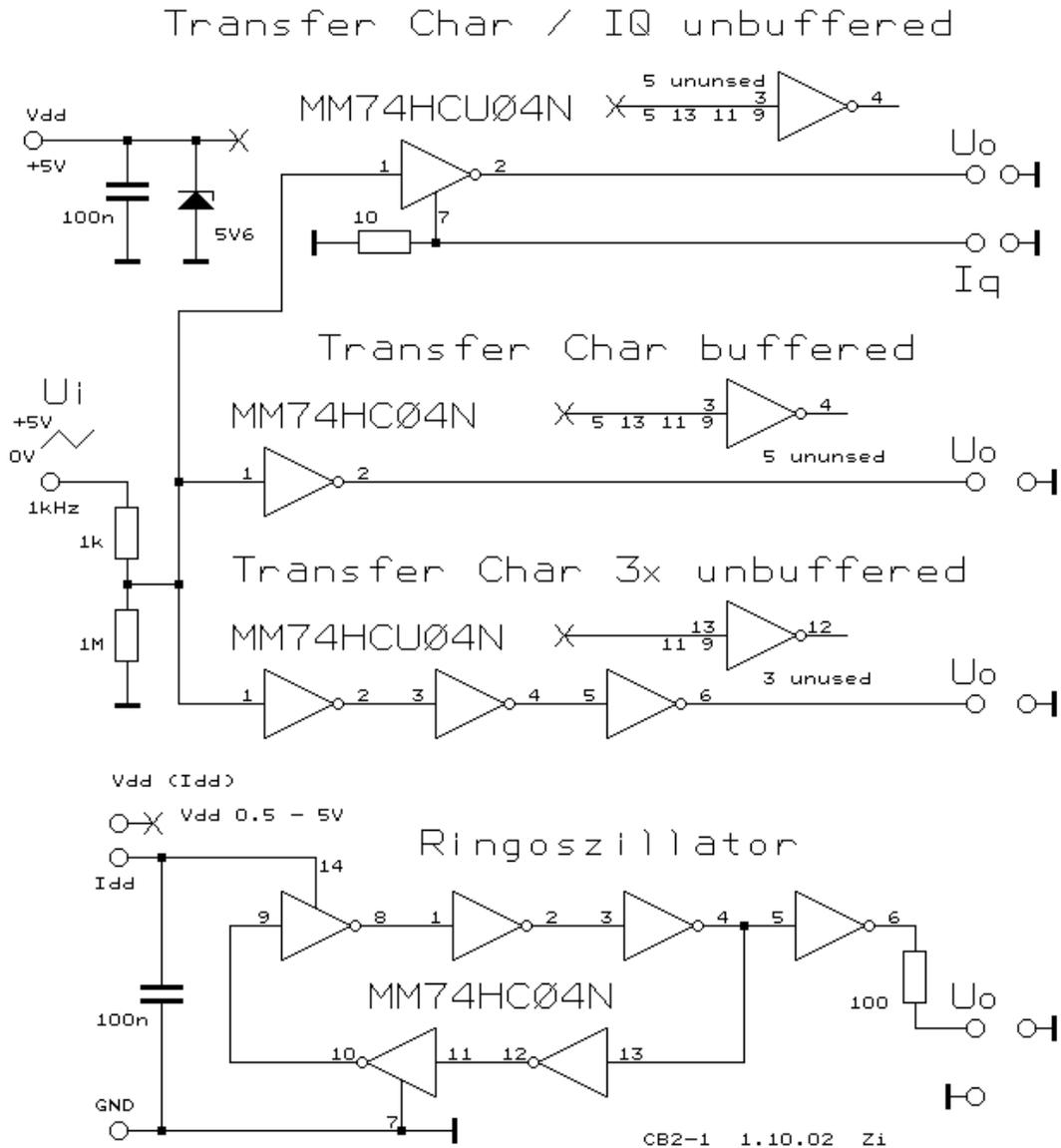
Achtung: Alle Spannungen von den Pins gegen Masse (GND) messen!

18. Bestimmen sie für jeden der drei ICs die Anordnung (Layout) der Tore im IC (1, 2, 3, 4 oder 5 gemäss Bild), und die Art der Tore. Tragen Sie Ihre Erkenntnisse auf dem Lösungsblatt ein. → B

Versuchen Sie zur Lösung der Aufgaben mit möglichst wenigen Messungen auszukommen. Gehen Sie nach den in Ihrer Vorbereitung entwickelten Flussdiagrammen vor.

Anhang

Vollständiges Schaltschema der Testschaltung Teil 1



Schaltschema Versuchsschaltung CMOS Inverter und Ringoszillator

leere Rückseite