

Hardwarepraktikum

**der Fakultät für Informatik
der Technischen Universität
Dortmund**

Skriptum

Dr.-Ing. Winfried Jansen

Sommersemester 2019

Kapitel 1 - Gatterschaltungen

Vorwort

In diesem Praktikum sollen Sie ihre in der Veranstaltung „Rechnerstrukturen“ erworbenen Hardwarekenntnisse vertiefen und experimentell nachvollziehen. Dazu steht Ihnen ein Simulator zur Verfügung, der alle erforderlichen Funktionalitäten bietet.

Anhand des Skripts lernen Sie schrittweise die elektrotechnischen Schaltzeichen kennen, die in digitalen Schaltungen Verwendung finden. Kapitelweise werden ausgewählte Themen der Digitaltechnik behandelt. Es werden Schaltungen analysiert, vorgegebene Schaltungen ergänzt oder vollständig neue Schaltungen aus einer leeren Vorlage heraus entworfen.

Der größte Teil der Versuche wird am Bildschirm mit Hilfe eines Simulators durchgeführt, Sie bauen also nicht physikalische Schaltungen mit echten Chips auf und verdrahten auch nicht im Sinne des Wortes.

Während des Hardwarepraktikums führen Sie auch Versuche mit Lego Robotern durch, mit dem Ziel, erste Einblicke in eingebettete Systeme zu gewinnen. Bei diesen Versuchen stellen Sie einen Legoroboter mit diversen Sensoren aus, der bestimmte Aufgaben erfüllen soll. Die Programmierung erfolgt am PC, die Programme werden per USB-Kabel auf den Roboter übertragen.

Das HaPra-Skript beruht auf Ausarbeitungen meines Vorgängers Dr. Karl-Heinz Temme. Einen herzlichen Dank an ihn für die langjährige gute Zusammenarbeit.

Der EWB-Simulator und HaPra-Skript

Sie finden das Skript und die Versuche zum EWB-Simulator auf dem zentralen Server unter Z:\EWB-Versuche: Die Versuche für den EWB-Simulator zum Hardwarepraktikum.

Z:\HaPra-Skript: Das Skript zur Benutzung des Simulators im Hapra.

Z:\RS-Skript: Das Skript (Teil 1) zur Vorlesung „Rechnerstrukturen“.

H:\: Ihr **H**ome-Directory zum Speichern der bearbeiteten Versuche.

Transistoren

Transistoren werden häufig stark vereinfacht als Schalter dargestellt. Das stimmt nur bedingt. Während bei einem Relais der Stromfluss entweder vollständig unterbrochen wird oder nur durch den so gut wie nicht messbaren Innenwiderstand eines Leiters, z.B. Kupfer, abgeschwächt wird, bewirkt ein Signal am Steuereingang eines Transistors, dass sich der Widerstand zwischen seinen beiden anderen Anschlüssen ändert. Je nach Ansteuerung des Transistors variiert der Widerstand zwischen annähernd 0 Ohm und unendlich. Dann sperrt er. Das wird bei analogen Schaltungen (z.B. Lautstärke am Lautsprecher) verwendet.

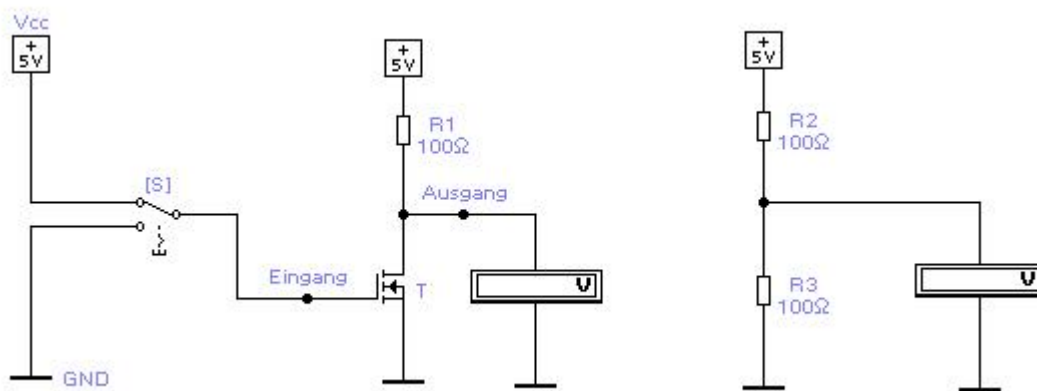
In unseren Schaltungen sind die Eingänge der zu untersuchenden Transistoren immer so beschaltet, dass die Transistoren entweder leiten oder sperren.

Versuch 100 Transistoransteuerung und -innenwiderstand

Öffnen Sie die Datei v100 (auf Z:\Versuche) und führen Sie den folgenden Versuch durch, indem Sie den durch die Taste S ansteuerbaren Schalter in die Positionen bringen, die für die Fragen 1.–3. erforderlich sind. Tragen Sie die gemessenen bzw. ermittelten Werte in die Kästen ein. Speichern Sie Ihre Ergebnisse im Home-Directory H:\.

Der rechte Teil der Schaltung ist ein primitives Ersatzschaltbild für die Laststrecke des Transistors, in dem der Widerstand R3 im statischen Fall den Innenwiderstand des Transistors darstellt. Durch einen Doppelklick auf R3 öffnet sich ein Fenster, in dem Sie den Widerstandswert ändern können.

Den Einschalter für den Simulator finden Sie oben rechts oberhalb des weissen Simulationsfeldes.



1. Welche Spannung messen Sie am Ausgang des Transistors T:
 - a) bei Eingang = 5V (Vcc)? (der Transistor leitet)
 - b) bei Eingang = 0V (GND)? (der Transistor sperrt)

a)	mV	b)	V
----	----	----	---

2. Verändern Sie den Widerstand R3 (Doppelklick), um indirekt zu ermitteln, welchen Innenwiderstand der Transistor T bei Eingang = 5V hat. (beide Messgeräte zeigen bei richtig eingestelltem R3 dieselbe Spannung an). Eine Nachkommastelle reicht.

Ω

3. Verändern Sie den Widerstand R3, um indirekt zu ermitteln, welchen Innenwiderstand der Transistor T bei Eingang = 0V mindestens hat. (ohne Kommastelle)

kΩ

Modellierung von Signalwerten

Spannungs- und Stromverläufe sind in der Realität kontinuierlich, d.h., es kann jeder beliebige Wert angenommen werden. In der Digitaltechnik beschränkt man sich auf diskrete Werte, im einfachsten Fall auf zwei, die die logischen Zustände 0 und 1 repräsentieren. Um das interne Verhalten von Gattern zu verstehen, bedarf es noch einiger weiterer Zustände.

Sieben Zustände

Nach IEEE 1164 wurden folgende Vereinbarungen getroffen:

0 bedeutet starker Zustand 0 „starke Null“
1 bedeutet starker Zustand 1 „starke Eins“
L bedeutet schwacher Zustand 0 „schwache Null“
H bedeutet schwacher Zustand 1 „schwache Eins“
X bedeutet starker unbestimmter Zustand „unbestimmt“
W bedeutet schwacher unbestimmter Zustand „schwach unbestimmt“
Z bedeutet abgetrennter Zustand „abgetrennt“

0 und 1 repräsentieren eine logische Null bzw. eine logische Eins. Schaltungstechnisch sind es direkte Anschlüsse an GND bzw. Vcc mit keinem oder nur sehr geringem Widerstand. Im HaPra arbeiten wir mit $GND = 0\text{ V}$ und $V_{cc} = 5\text{ V}$.

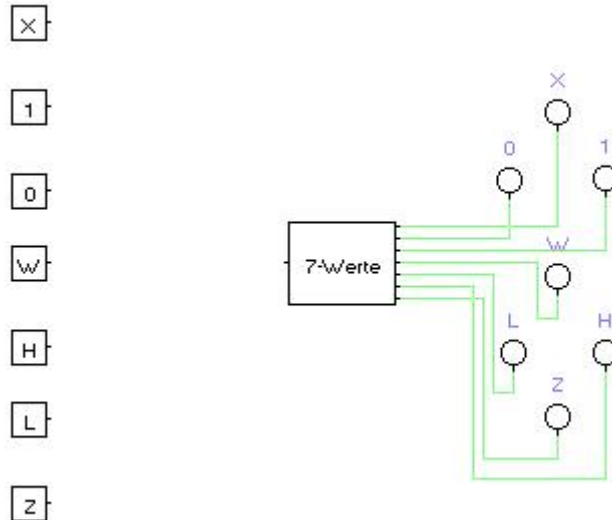
L und H repräsentieren ebenfalls eine logische Null bzw. eine logische Eins. Die Anschlüsse an GND bzw. Vcc sind hierbei aber durch Widerstände (100 Ohm) merklich gedämpft.

X und W repräsentieren Kurzschlüsse zwischen (0,1) bzw. (L,H). Sie stellen die unbestimmten logischen Zustände dar.

Z ist der Zustand auf einer nicht angeschlossenen Leitung oder an einem Ausgang eines gesperrten Transistors.

Versuch 105 7-Zustände-Messgerät

Im Folgenden arbeiten wir nur noch mit vorgefertigten Makros, die die sieben Zustände erzeugen. Prüfen Sie in der Datei v105, was das 7-Werte-Messgerät beim Anschließen an die entsprechenden Spannungsquellen anzeigt.



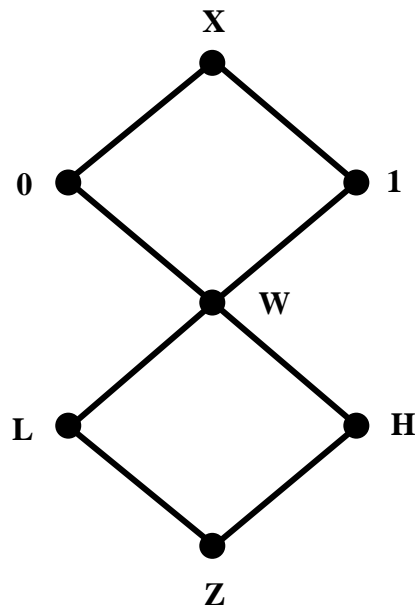
Sie können das 7-Werte-Messgerät mit einer der Quellen verbinden, indem Sie mit dem Cursor der Maus auf den linken Anschluss des Kastens 7-Werte-Messgerät zeigen. An der Spitze des Mauspeils erscheint ein schwarzer Punkt. Halten Sie nun die linke Maustaste gedrückt und ziehen Sie die Leitung zu einem der Anschlüsse auf der linken Seite, bis wieder ein schwarzer Punkt erscheint. Lassen Sie die Maustaste los. Die Anschlüsse sind nun mit einer Leitung verbunden. Sie lösen die Leitung, indem Sie sie mit der Maus vom Punkt wegziehen.

Verknüpfung von Zuständen

Es stellt sich nun die Frage, was passiert, wenn zwei Zustände in einem Leiterknoten aufeinandertreffen. Die Namen der Zustände geben schon erste Hinweise darauf, welche Zustände sich im Zweifelsfall durchsetzen werden. Wir definieren eine Funktion Cond:

$$\text{Cond} : \{0, 1, L, H, X, W, Z\}^2 \rightarrow \{0, 1, L, H, X, W, Z\}$$

und betrachten zur Festlegung der Funktionswerte die Relation „stärker als“. Ein Teil dieser Relation kann graphisch durch ein Hasse-Diagramm dargestellt werden.



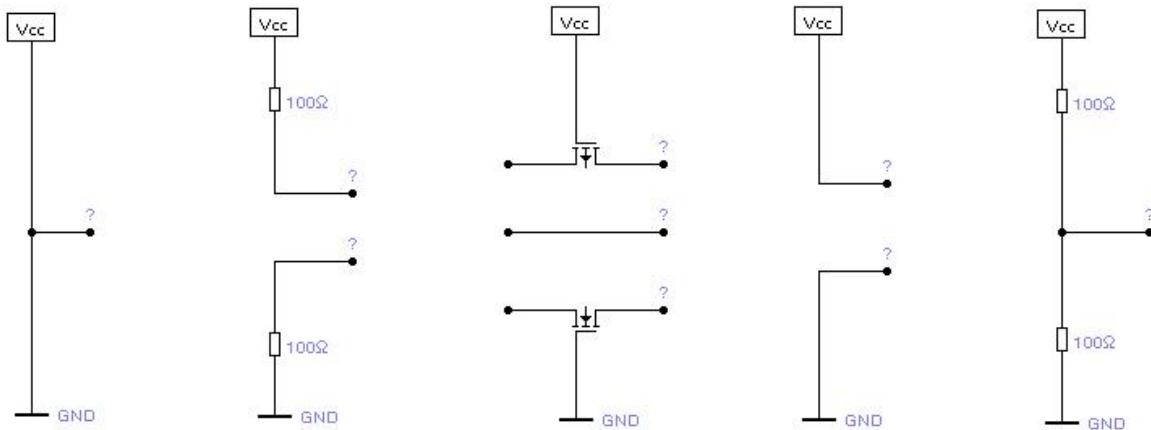
Eine Verbindung zwischen zwei Knoten gibt an, dass das Paar zur Relation gehört. Es bedeutet, dass das höher stehende Element stärker ist als das niedrigere. Bildet man nun die transitive Hülle, so erhält man die gesamte Relation.

Die Relation „stärker als“ induziert eine Halbordnung auf $\{0, 1, L, H, X, W, Z\}$. Gemäß dieser Halbordnung ist nun $\text{Cond}(x,y)$ definiert als das Supremum (x,y) . Da wir es hier mit einer endlichen Menge zu tun haben, ist das Supremum also das kleinste Element, das gerade noch stärker ist als beide Argumente. Falls „x stärker als y“ gilt - entweder direkt aus dem Hasse-Diagramm oder aus der transitiven Hülle ableitbar -, dann ist das Supremum gleich dem Maximum von x und y.

Die Relation „stärker als“ ist transitiv. Zeigen Sie mit Hilfe dieser Eigenschaft, dass $\text{Cond}(0,Z) = 0$ ist. Verwenden Sie folgende Notation: $x \geq y$ bedeutet „x ist stärker als y“.

Versuch 110 7 Zustände (technisch)

Machen Sie sich die Bedeutung der sieben Zustände wie folgt klar:



In der mittleren Schaltung werden beide Transistoren im Sperrzustand betrieben.

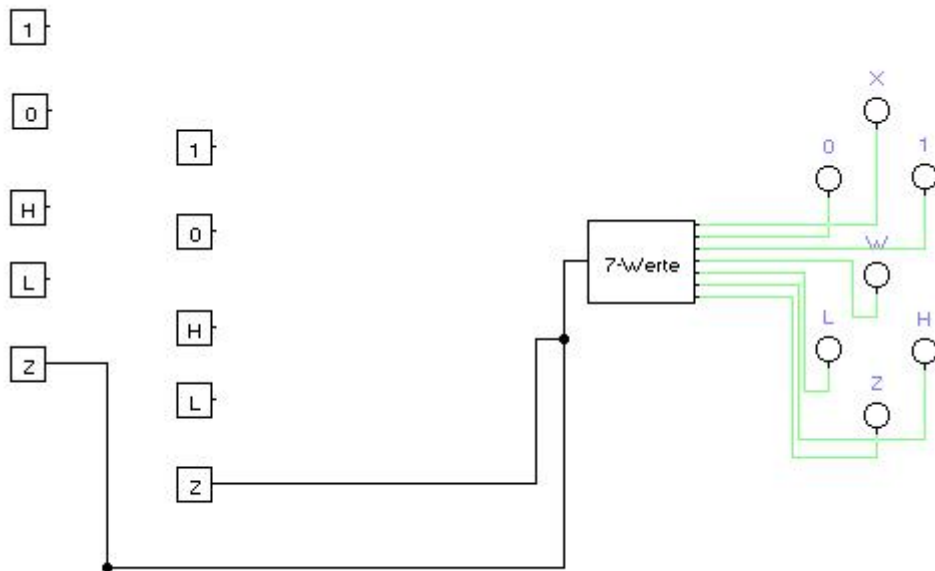
Ersetzen Sie in der Datei v110 die "?" durch die richtigen Elemente der möglichen sieben Zustände. Speichern Sie das Ergebnis ab.

Sie können die Beschriftung eines Punktes (eines Bauteils) ändern, indem Sie das Objekt anklicken und Strg-B drücken oder auf das Bauteil einen „Doppelklick“ anwenden.

Versuch 115 Verknüpfung von Zuständen

Im Folgenden werden die Kurzschlusszustände W und X als „Eingaben“ nicht mehr betrachtet.

Prüfen Sie in der Datei v115 anhand von Stichproben, ob das 7-Werte-Messgerät die Verknüpfung zweier beliebiger Werte korrekt gemäß der „stärker als“ Relation anzeigt.



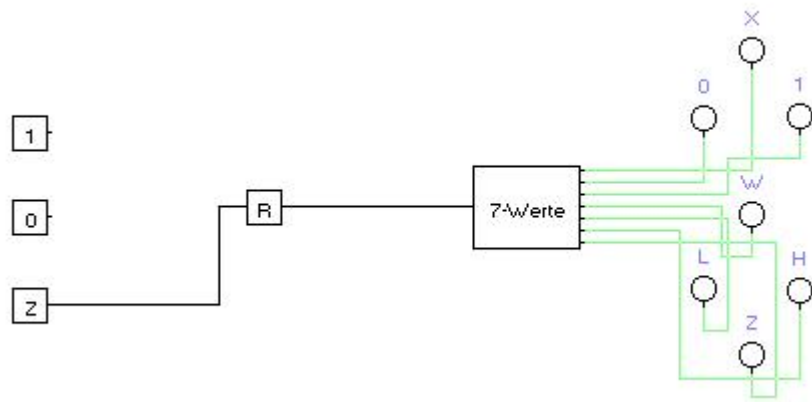
Die Bedeutung der Zustände 0, 1, X und Z ist offensichtlich, sie repräsentieren die vier Möglichkeiten, die man mit 0 Volt (GND), Versorgungsspannung +5 Volt (Vcc) und einer Leitung hat:

- die Leitung an 0 Volt GND anschließen,
- die Leitung an die Versorgungsspannung +5 Volt Vcc anschließen,
- mit der Leitung Vcc und GND kurzschließen,
- die Leitung gar nicht anschließen.

Die Zustände H und L entstehen, wenn an 1 oder 0 ein Widerstand (z.B. 100 Ohm) angeschlossen wird. Ein W ergibt sich durch Zusammenschalten von H und L. Ein Z bleibt ein Z.

Versuch 120 Schwache Zustände

Prüfen Sie in der Datei v120, ob durch den Widerstand R (100 Ohm) die zugehörigen "schwachen" Werte (L und H) entstehen.



Transistoren als Schaltelemente

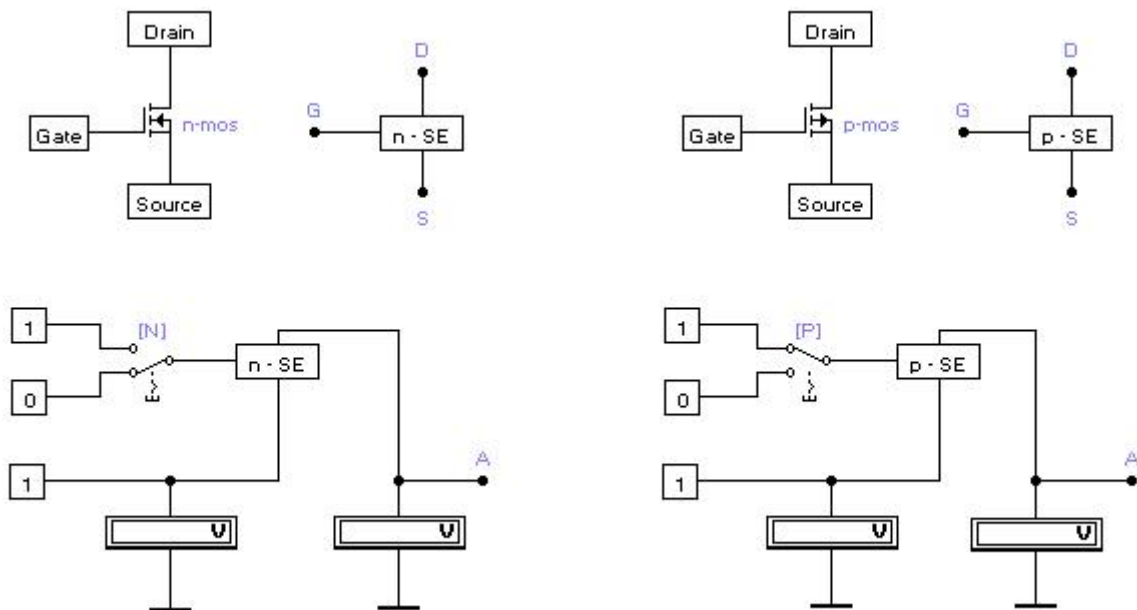
Wie wir schon beim ersten Versuch dieses Kapitels gesehen haben, kann man einen Transistor als Schalter ansehen, der in Abhängigkeit von seinem Steuereingang sperrt (hochohmig wird) oder leitet (einen geringen Widerstand annimmt). Wir unterscheiden nun zwischen n-MOS Transistoren (n-Schaltelementen, kurz: n-SE) und p-MOS Transistoren (p-Schaltelementen, kurz: p-SE). Beide Typen besitzen die Anschlüsse Gate, Source und Drain, wobei Gate der Steueranschluss ist. MOS ist eine Abkürzung für Metal-Oxid-Semiconductor.

Versuch 125 Ansteuerung von Transistoren (Teil 1)

Stellen Sie in der Datei v125 im nachfolgenden Versuch fest, bei welcher Steuerungseingangsbeschaltung welcher Transistortyp leitet.

Vereinbarung im HaPra:

Im Folgenden werden statt der Transistorsymbole Kästchen mit der Beschriftung n-se oder p-se verwendet.



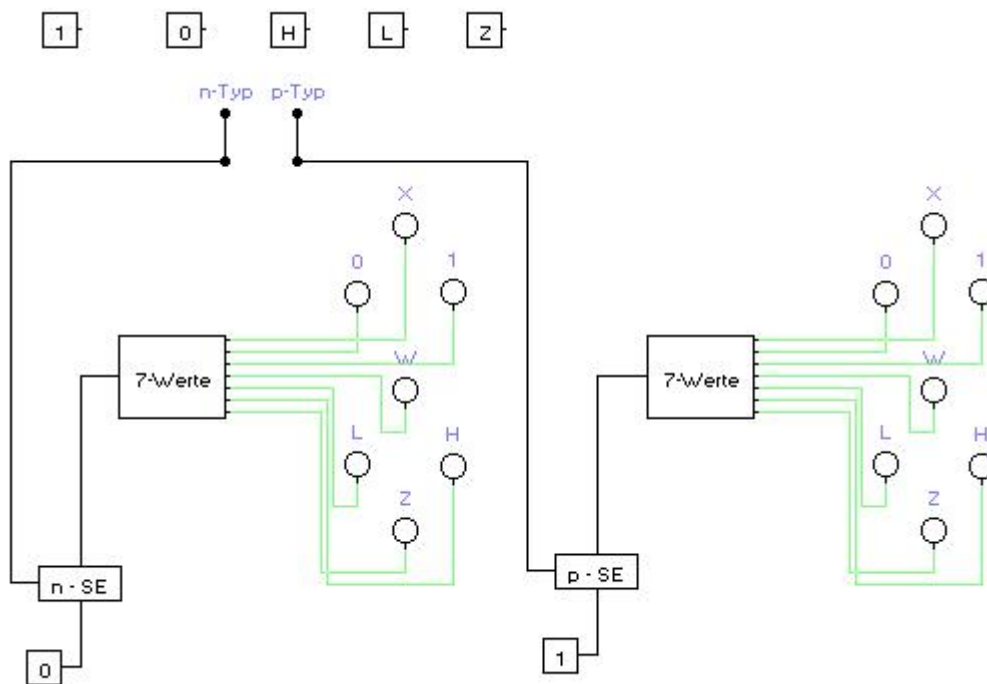
Messen Sie für n-SE und p-SE die Spannung am Anschluss A, wenn Sie das Gate G:

a) mit 1 verbinden, b) mit 0 verbinden.

n-se	p-se
a)	a)
b)	b)

Versuch 130 Ansteuerung von Transistoren (Teil 2)

Leitende Transistoren sollten den Wert, der am Anschluss Source anliegt, an Drain weitergeben. Wenn man nur mit den Zuständen 0 und 1 arbeitet, verhalten sich die Transistoren wie erwartet. Testen Sie in der Datei v130 nun Kombinationen mit den anderen drei Zuständen. Geben Sie an, bei welchen Zuständen am Steuereingang die Schaltelemente sperren. Überprüfen Sie zunächst den n-Typ und danach den p-Typ.



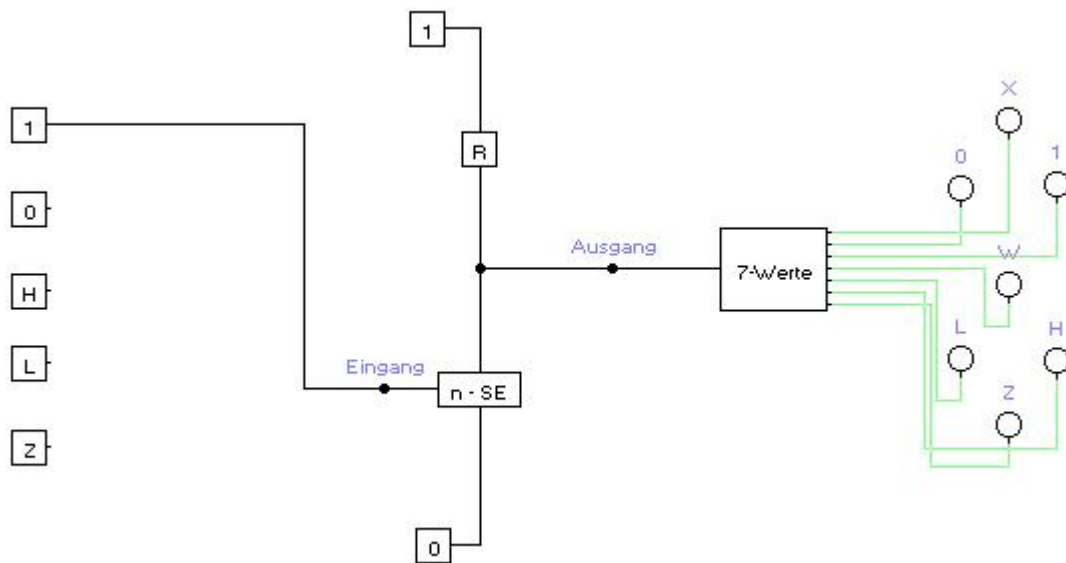
Das n-se sperrt bei:

Das p-se sperrt bei:

Versuch 135 n-MOS Inverter

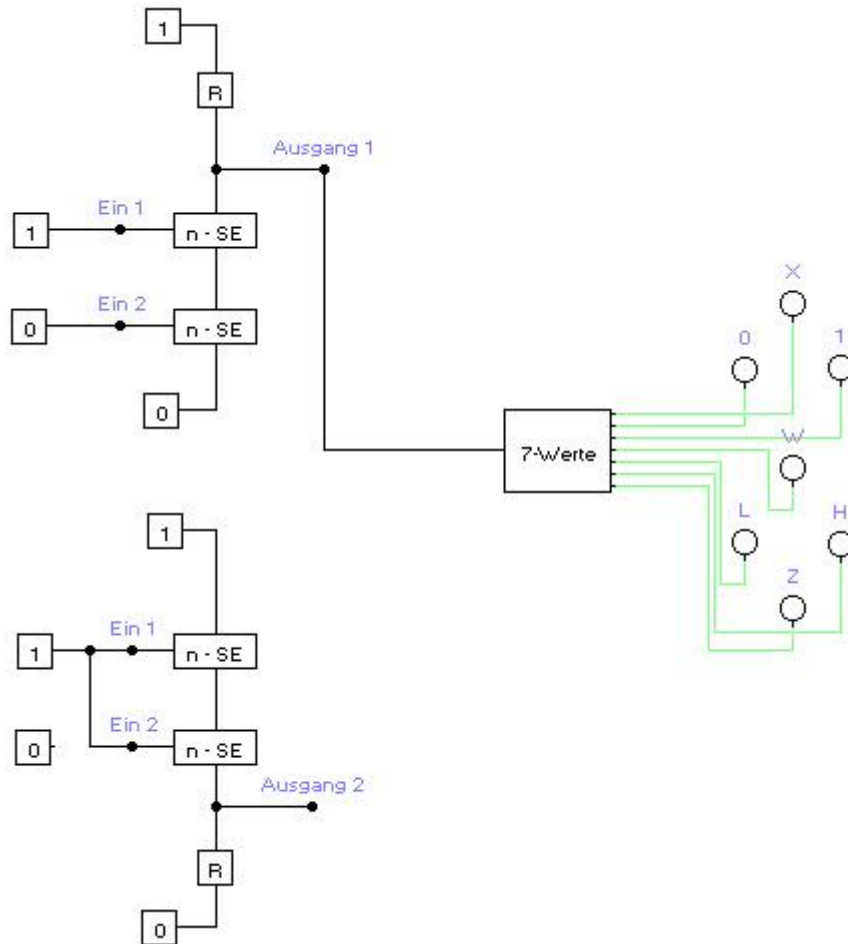
Das einfachste Gatter ist ein Inverter. Er kann z.B. aus einem n-SE und einem Widerstand konstruiert werden, die man in Reihe zwischen 1 (Vcc) und 0 (GND) schaltet. Der Widerstand ist erforderlich, damit beim leitenden Zustand der Strom begrenzt wird, sonst würde sich eine real aufgebaute Schaltung selbst zerstören.

Testen Sie den n-MOS Inverter in Datei v135. Interpretieren Sie Ihre Messungen (Cond-Funktion am Leiterknoten benutzen).



Versuch 140 Gatter mit zwei Eingängen I

Eine Erweiterung der Inverterschaltung besteht darin, zwei n-SE in Reihe zu schalten und den Widerstand entweder unter- oder oberhalb des Ausgangs zu platzieren. Führen Sie den nachfolgenden Versuch in Datei v140 durch und bestimmen Sie, welche Booleschen Funktionen die beiden Gatterschaltungen realisieren.

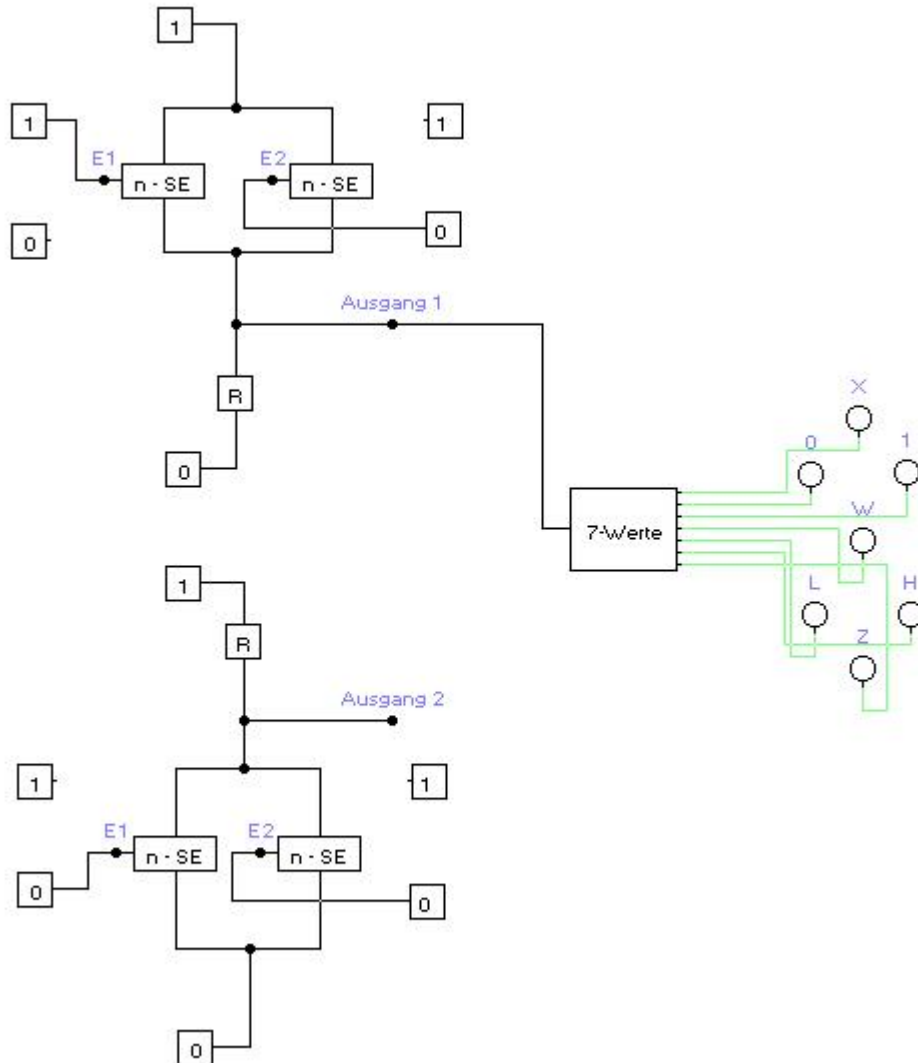


Testen Sie für beide Gatter alle Eingangskombinationen durch. Welche Boolesche Funktion realisiert Ausgang 1, welche Ausgang 2? Geben Sie die Namen der Funktionen an.

Ausgang 1:	Ausgang 2:
------------	------------

Versuch 145 Gatter mit zwei Eingängen II

Alternativ kann man auch beide n-SE parallel schalten (Datei v145). Um welche Gatter handelt es sich jetzt?



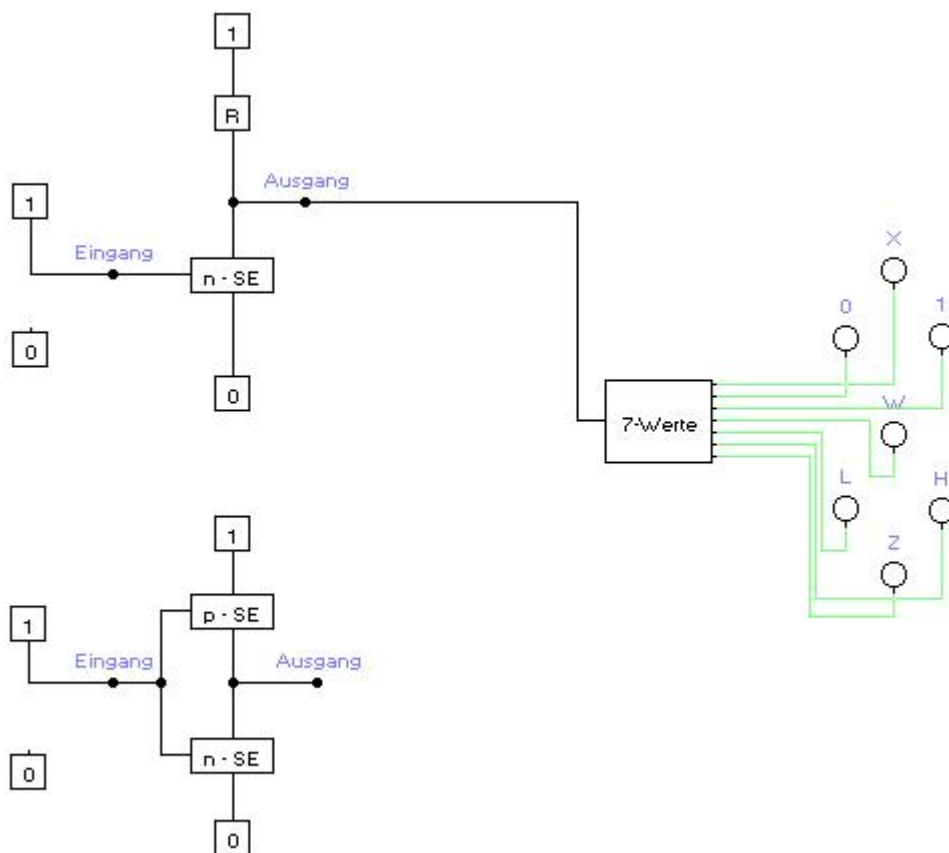
Testen Sie für beide Gatter alle Eingangskombinationen durch. Welche Boolesche Funktion realisiert Ausgang 1, welche Ausgang 2? Geben Sie die Namen der Funktionen an.

Ausgang 1:	Ausgang 2:
------------	------------

Versuch 150 CMOS-Inverter und Vergleich

Betrachten wir noch einmal einen Inverter. Man nennt diese Schaltung auch Nicht-Gatter oder NOT-Gatter. Bei der n-MOS Realisierung besteht das Problem, dass sich im leitenden Zustand die 0 von unten gegenüber dem H von oben durchsetzen muss. Hierdurch entsteht im Widerstand R unerwünschte Wärme, die fortlaufend produziert wird, solange der Transistor leitet. Als Alternative hat man die CMOS-Technologie entwickelt. Beim Inverter wird hierbei der Widerstand R durch einen p-MOS Transistor ersetzt, was allerdings einen größeren Aufwand bei der Chip-Herstellung bedeutet.

Vergleichen Sie in der Datei v150 den n-MOS-Inverter (oben) mit dem CMOS-Inverter (unten). Welche Unterschiede haben Sie gefunden? Welche Vor- und Nachteile haben beide Schaltungstechnologien?

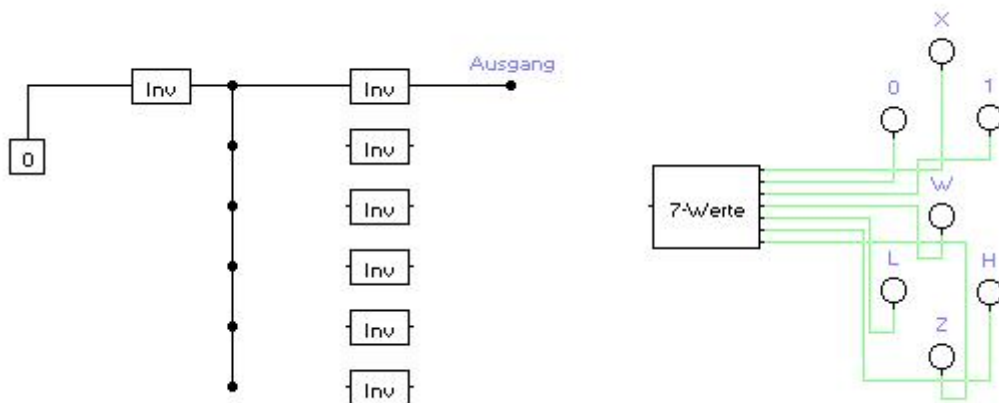


	n-MOS	CMOS
Vorteile		
Nachteile		

Versuch 160 Fanout

Der Fan-out eines Gatters ist die maximale Anzahl von Eingängen, die man an den Ausgang eines Gatters anschließen kann, ohne dass die logischen Pegel am Ausgang des Gatters verfälscht werden.

Ideale Inverter sind rein spannungsgesteuert. Bei realen Invertern gibt es eine – wenn auch stark gedämpfte – Verbindung zwischen Gate und Source, die Strom verbraucht. Dies führt dazu, dass man nicht beliebig viele Eingänge nachfolgender Gatter an den Ausgang eines Gatters hängen kann.



Die oberen beiden Inverter sind hintereinander geschaltet. Der rechte angeschlossene Inverter liefert am Ausgang denselben logischen Wert, der am Eingang des linken Inverters anliegt. Verbinden Sie in Datei v160 das Messgerät mit dem Ausgang des rechten Inverters und prüfen Sie das Ergebnis. Nun verbinden Sie nacheinander den Ausgang des linken Inverters mit weiteren Invertereingängen.

Ab wie vielen angeschlossenen Eingängen wird das Ergebnis am Ausgang des rechten Inverters verfälscht?

Verfälschung:	
---------------	--

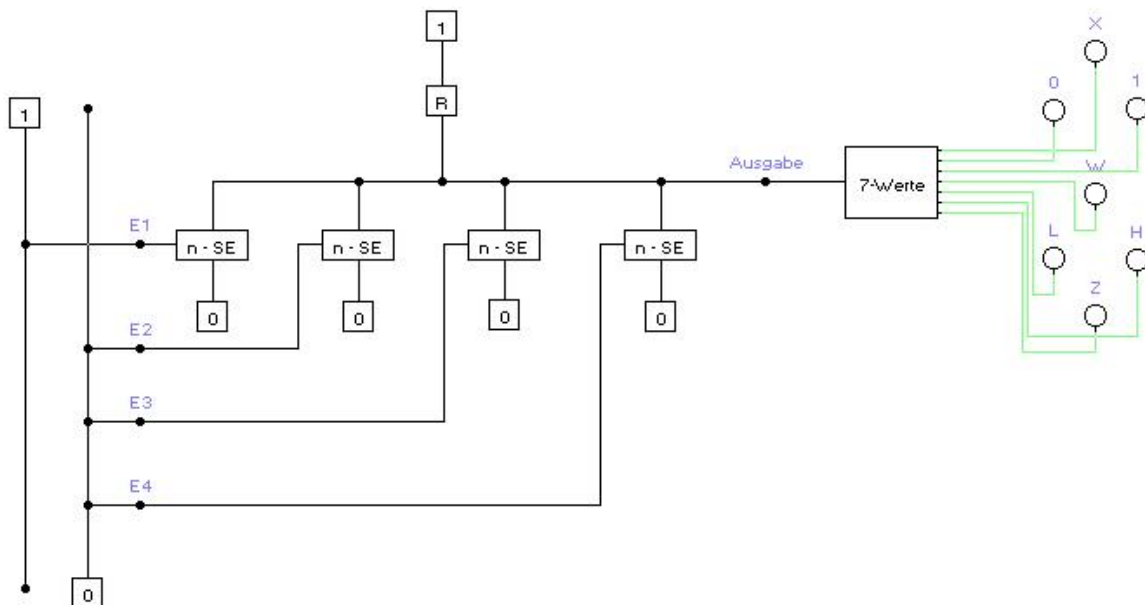
Wie hoch ist also das Fanout dieses Invertertyps? (Es tritt keine Verfälschung auf.)

Fanout:	
---------	--

WIRED-Schaltungen

Das Prinzip der Parallelschaltung kann bei Gattern auch auf mehr als zwei Eingänge erweitert werden. Man nennt diesen Schaltungstyp WIRED. Beim Wired OR oder NOR werden einfach nur weitere n-SE parallel zu den bisherigen geschaltet, bis die gewünschte Anzahl an Eingängen erreicht wird. Man kann aber auch AND oder NAND durch WIRED Schaltungen realisieren. Dazu werden hier n-SE in Reihe geschaltet. Das gewünschte Ergebnis wird direkt oder durch eine nachgeschaltete Inverterstufe erzielt (in den nachfolgenden Schaltungen nicht enthalten). Analysieren Sie die Schaltung und erklären Sie die Funktionsweise.

Versuch 170 Wired-Schaltung



Realisierte Boolesche Funktion:

Sie benötigen die Kenntnis über diese Schaltung in späteren Versuchen.

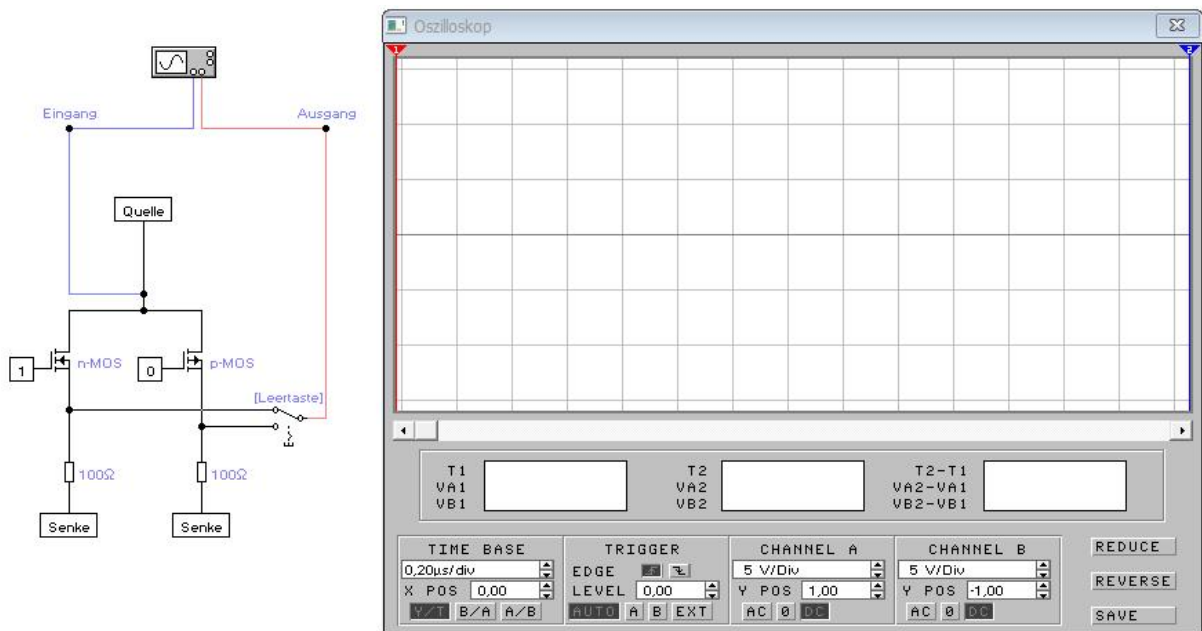
Durchschaltverhalten von MOS-Transistoren

Versuch 180 Signalverfälschung

MOS-Transistoren zeigen bezüglich ihres Schaltverhaltens, dass sie keine idealen Schalteigenschaften besitzen. Das Durchschaltverhalten und die Weiterleitung eines 0- und eines 1-Pegels zeigen je nach Transistormodel ein unterschiedlich gutes Verhalten.

Bestimmen Sie, welcher Pegel bei welchem Transistortyp verfälscht durchgeleitet wird.

Öffnen Sie dazu die Datei v180 und schalten Sie die Simulation ein. Warten Sie einige Sekunden, bis sich das Bild stabilisiert hat.



Bei beiden Transistoren ist am Gate der passende Wert für das Durchschalten (Weiterleiten) angelegt. Vergleichen Sie die Rechteckkurve (0V und 5 V), die in „Quelle“ erzeugt und am Source-Anschluss des Transistors eingespeist wird, mit der Ausgangskurve am Drain-Anschluss, die von der „Senke“ aufgenommen wird.

Messen Sie das Durchschaltverhalten des n-MOS und p-MOS Transistors. Welcher Spannungspegel wird verfälscht und welcher unverfälscht durchgeleitet? Ignorieren Sie die abgerundeten Kanten der Flanken, betrachten Sie nur die Pegel (0V und 5V).

Das Messgerät ist so eingestellt, dass auf der y-Achse ein Kästchen genau 5V entspricht. Bei einem idealen Transistor können Sie erwarten, dass die gemessene Spannung also genau auf den Kästchengrenzen verläuft. Was beobachten Sie?

	n-MOS bei logischem Pegel	p-MOS bei logischem Pegel
Verfälschung bei:		

Versuch 190 Steuerbares Transmissionsgatter

Wir haben festgestellt, dass MOS-Transistoren nur jeweils einen Pegel korrekt und den anderen verfälscht durchleiten. Das ist für eine Datenübertragung im Computer nicht wünschenswert, da es zu Fehlern bei der Datenübertragung führen könnte.

Im Folgenden wollen wir die Grundlage für ein Transmissionsgatter schaffen, bei dem beide Pegel unverfälscht durchgeleitet werden. Am Ende des Versuchs steht der Aufbau eines Tri-State-Gatters, das in jedem Computer z.B. am Adressbus verwendet wird.

Ein Transmissionsgatter besitzt einen Steuereingang, einen Eingang (A) und einen Ausgang (B).

Datenübertragung von A nach B:

Gegeben sind ein n-se und ein p-se, die zum Durchschalten der logischen Pegel 0 und 1 so verschaltet werden sollen, dass beim Durchschalten von A (Eingang) nach B (Ausgang) keine Signalverfälschung entsteht. Zur Überprüfung liegt ein Messgerät „Mess“ bereit. Es darf beim Testen der Schaltung in keinem Fall einen Fehler anzeigen.

Steuereingang:

Wenn am Steuereingang eine 1 anliegt, leitet das n-se einen Pegel (von A nach B) unverfälscht durch und liefert für den anderen Pegel einen verfälschten Wert. Bei Steuereingang = 0 liefert n-se an B immer den Zustand Z.

Wenn am Steuereingang eine 0 anliegt, leitet das p-se einen Pegel (von A nach B) unverfälscht durch und liefert für den anderen Pegel einen verfälschten Wert. Bei Steuereingang = 1 liefert p-se an B immer den Zustand Z.

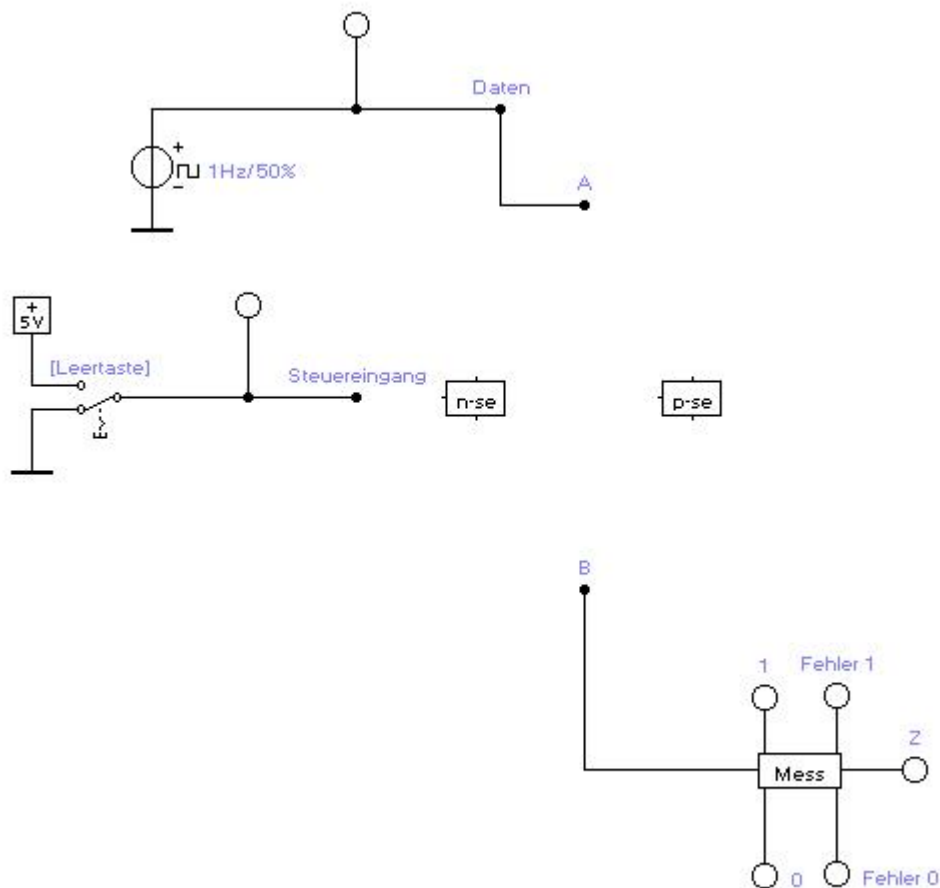
Bei einer 1 am Steuereingang soll das Transmissionsgatter die Daten (0 oder 1) von A unverfälscht nach B weiterleiten.

Bei einer 0 am Steuereingang soll das Transmissionsgatter an B ein Z liefern, unabhängig davon, was an A anliegt.

Aufgabe:

Es soll ein steuerbares (Leertaste) Transmissionsgatter entworfen werden, das die Signale des Testgenerators als Rechtecksignal 0 und 1 unverfälscht vom A nach B durchleiten kann.

Hinweis: Sie benötigen beim Aufbau außer Leitungen genau ein logisches Schaltelement der EWB-Bibliothek.



Bauen Sie die Schaltung auf, schalten Sie die Simulation ein, und prüfen Sie, ob bei Steuereingang = 1 die Nullen und Einsen unverfälscht weitergeleitet werden. Schalten Sie nun den Steuereingang um (Leertaste). Das Messgerät soll nun Z anzeigen. Speichern Sie die fertige Schaltung ab.

Wie z.B. beim Und-Gatter gibt es auch für ein Transmissionsgatter vorgefertigte Bauteile in der EWB-Bibliothek.

Es ist das sogenannte Tristate-Gatter. Es ist im EWB als Bauteil vorhanden:



Das Tristate-Gatter ist nicht-invertierend und besitzt genau wie das entworfene Transmissionsgatter einen Steuereingang, der mit EN (ENable) bezeichnet wird.

Bei $EN = 1$ liefert B den Zustand, der an A anliegt. Bei $EN = 0$ wird der Ausgang B in den Zustand Z geschaltet. Das ermöglicht das parallele Anschließen der Ausgänge (B) von verschiedenen Tristate-Gattern auf einen Bus (z.B. Adressbus).

Dieses Tristate-Gatter wird in späteren Versuchen benutzt.