

Transistoren

Transistoren sind Halbleiterbauelemente mit drei Anschlüssen, die als Verstärker und Schalter Verwendung finden.

Dabei erscheint das am Steuereingang zugeführte Signal am Ausgang verstärkt aber mit 180 Grad Phasendrehung. Eine Spannungserhöhung am Eingang bewirkt eine Erniedrigung am Ausgang und umgekehrt.

Während Röhren nur mit positiven Betriebsspannungen arbeiten können, gibt es alle Transistortypen für positive und negative Betriebsspannungen.

Neben den 1949 erfundenen bipolaren Transistoren spielen heute die Feldeffekttransistoren eine eben so große Rolle. Letztere wurden erst 20 Jahre später eingeführt. Sie verwenden einen anderen Steuerungsmechanismus als die bipolaren Transistoren.

In der Tabelle sind alle Typen mit ihren kennzeichnenden Eigenschaften gegenüber gestellt:

Transistorfamilie		Unter-Typ	typische Betriebs-spannung	typische Eingangsspannung U_{BE} bzw. U_{GS}	typischer Basis/Gate Strom
Bipolarer Transistor		npn	+2 .. +20 V	ca. +0,7 V	+0,1 .. +5 mA
		pnp	-2 .. -20 V	ca. -0,7 V	-0,1 .. -5 mA
Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor (FET)		n-Kanal	+3 .. +20 V	(+0,5 ..) 0 .. -2 V	fast Null
		p-Kanal	-3 .. -20 V	(-0,5 ..) 0 .. +2 V	fast Null
IG-FET (isolated Gate) oder MOS-FET (metal oxide semiconductor)	Verarmungstyp (selbstleitend)	n-Kanal	+3 .. +20 V	0 .. -5 V	Null
		p-Kanal	-3 .. -20 V	0 .. +5 V	Null
	Anreicherungstyp (selbstsperrend)	n-Kanal	+3 .. +20 V	0 .. +5 V	Null
		p-Kanal	-3 .. -20 V	0 .. -5 V	Null

Jeder dieser 8 Typen hat ein international genormtes Schaltsymbol, das in der Prüfung abgefragt wird! Sobald man die Grundfunktion der verschiedenen Transistoren verstanden hat, läßt sich das Symbol logisch erklären und damit auch lernen.

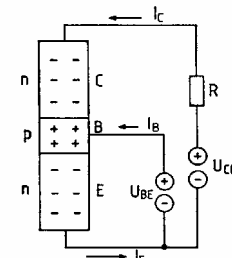
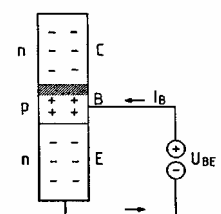
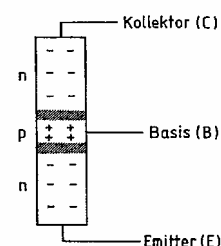
Bipolare Transistoren

Bipolare Transistoren bestehen im Prinzip aus zwei gegeneinander angeordneten pn-Übergängen (oder Dioden!), wobei die gemeinsame mittlere Zone sehr dünn ist.

Beim **npn-Transistor** ist der Emitter n-dotiert (Elektronenquelle), der Steueranschluß (die Basis) ist p-dotiert und der Kollektor (Ausgangsanschluß) wieder n-dotiert. Gegenüber der Basis sind also Emitter und Kollektor quasi Kathoden und die Basis ist für beide "Dioden" die Anode.

Allerdings ist dies nur eine Merkhilfe, denn zwei entgegengesetzt zusammen geschaltete Dioden ergeben noch keinen Transistor. Das "Ersatzschaltbild" zeigt aber, daß vom Emitter zum Kollektor (oder umgekehrt) eigentlich nie ein Strom fließen dürfte. Denn: wie man die Polarität auch wählt, eine der beiden Dioden ist immer gesperrt.

Beim realen Transistor ist die Sperrschicht sehr dünn, so daß Vorgänge in einer Verarmungszone die Ladungsverteilung in der anderen mit beeinflussen. Legt man zwischen Basis und Emitter eine Spannung von der Größe der Diffusionsspannung an - im Beispiel beim npn Transistor also etwa +0,7 Volt - verschwindet die Verarmungszone der Basis-Emitterdiode und die Elektronen aus dem Emitter können die Sperrschicht überwinden und es fließt ein Basisstrom. Im Bild (Mitte) ist die technische Stromrichtung gezeichnet!



Ohne Spannungsquelle am Kollektor bleibt die Sperrschicht der Kollektor-Basis-Diode bestehen. Und wenn man bei nicht angeschlossener Basis eine positive Spannung an den Kollektor legt, wird die Verarmungszone sogar noch verbreitert, da die Elektronen aus dem n-dotierten Kollektorbereich "abgezogen" werden und für die Rekombination nicht mehr verfügbar sind.

Sobald aber die Basis-Emitter-Diode leitet, stehen in der Basiszone so viele Elektronen zur Verfügung, daß die Kollektor-Basis Sperrschicht ebenfalls abgebaut wird und sogar ein großer Teil der vom Emitter kommenden Elektronen zum Kollektor fließen, da dort ein wesentlich positiveres Potential herrscht. Nur ein kleiner Teil der Elektronen macht sich als Basisstrom bemerkbar.

Das Verhältnis zwischen Kollektorstrom und Basis-"Steuer"-Strom ist vom Transistorexemplar abhängig und wird Stromverstärkung β (griechisch: beta) genannt. In der Praxis liegen die Werte der Stromverstärkung zwischen 25 bis 50 für schnelle Hochfrequenz-Transistoren und 100 bis über 500 für Universaltransistoren mit oberen Grenzfrequenzen von rund 100 MHz.

Der Steuermechanismus der bipolaren Transistoren beruht also auf der Steuerung durch einen Basis-**Strom**. Die Basisspannung verändert sich dabei nur unwesentlich und sie ist außerdem mit dem Basisstrom über eine stark nichtlineare, exponentielle Beziehung verknüpft.

Nur für interessierte Funkamateure (kein Prüfungsstoff!):

Es gilt:

$$I_B = I_S * \left(e^{U_{BE}/U_T} - 1 \right)$$

Darin ist I_S der Sättigungssperrstrom und U_T die sog. Temperaturspannung $U_T = k T / e$ mit

$k = 1,3803 * 10^{-23}$ [VAs / grad] (Boltzmann-Konstante),

T = Sperrschichttemperatur in Grad Kelvin und

$e = 1,602 * 10^{-19}$ As (Elektronenladung

woraus sich bei einer Sperrschichttemperatur von 29 °C (302 K) ein Wert von $U_T = 26$ mV ergibt. In der Praxis beobachtet man auch etwas abweichende Werte von U_T , was durch nicht konstante Dotierungen in den Sperrschichten zu höheren Elektronenbeweglichkeiten führt, was einer scheinbar höheren Temperatur entspricht, aber auch höhere Sperrströme zur Folge hat, die aber immer noch im nano-Ampere-Bereich liegen.

Bei näherer Analyse der Formel ergibt sich, daß I_B bei jeder Erhöhung von U_{BE} um 60 mV jeweils auf das 10-fache steigen müßte, denn $U_T * \ln(10) = 60$ mV bei $U_T = 26$ mV.

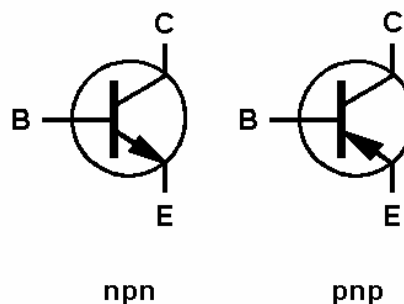
Prinzipiell könnte man Emitter und Kollektor vertauschen. Das war beim ursprünglichen **Bipolaren** Transistor auch der Fall - und daher der Name! Heute sind diese beiden Elektroden unterschiedlich ausgeführt. So hat die Basis-Emitter-Diode nur eine geringe Sperrspannung von wenigen Volt (typisch 5 Volt). Die Kollektordiode hat dagegen eine deutlich höhere Durchbruchspannung: je nach Typ von minimal 20 Volt bis über 1000 Volt. Auch wäre die Stromverstärkung bei inversem Betrieb nur gering. Der Beiname **bipolar** ist dem "normalen" Transistor zur Unterscheidung gegenüber den Feldeffekttransistoren aber geblieben.

Der **pnp-Transistor** hat prinzipiell die gleichen Eigenschaften wie der npn-Transistor. Er "lebt" aber von der Löcherleitung an Stelle der Elektronenleitung. In der Praxis interessiert das niemanden und es bleibt nur ein wesentlicher Unterschied gegenüber dem npn-Transistor:

Die **Betriebsspannungen** des **pnp-Transistors** an Kollektor und Basis sind beide **negativ**.

Im Schaltsymbol des bipolaren Transistors erhält der Emitter einen **Pfeil**, der in Richtung auf die **n-Dotierung** zeigt. Das entspricht dem Pfeil im Diodensymbol, der ja auf die Kathode zeigt. Der Pfeil zeigt also beim **nnp-Transistor zum Emitter** und beim **pnp-Transistor zur Basis**.

Man könnte sich auch merken, daß der Pfeil die technische Stromflußrichtung durch den Transistor anzeigt. Das stimmt zwar, wenn man weiß, daß der npn-Transistor positive und der pnp-Transistor negative Betriebsspannungen hat. Diese Logik versagt aber bei den Feldeffekttransistoren.



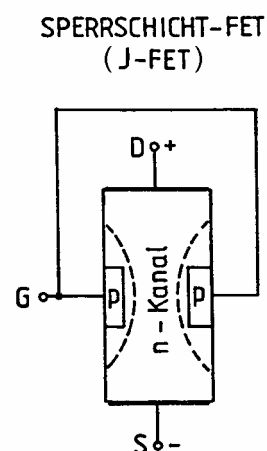
Sperrschicht FeldEffekt Transistor FET

Beim Sperrschicht-FET (englisch: J-FET Junction Field Effect Transistor) wird der Stromfluss durch ein elektrisches Feld gesteuert und da man dazu fast keinen Steuerstrom braucht, ist diese Steuerung nahezu leistungslos wie bei der Elektronenröhre.

Die Anschlüsse eines Feldeffekt-Transistors heißen:

- Source** (Quelle, entspricht dem Emitter bzw. der Röhrenkathode)
- Gate** (Tor, entspricht der Basis bzw. dem Gitter der Röhre) und
- Drain** ("Drainage", entspricht dem Kollektor bzw. der Röhrenanode).

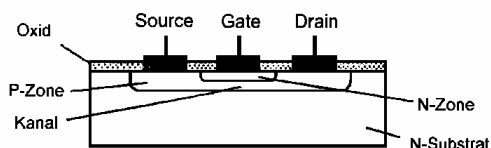
Beim **n-Kanal-J-FET** besteht die Verbindung zwischen Source und Drain aus einem n-dotierten Stäbchen oder Plättchen, das in der Mitte durch eine p-dotierte Zone stark eingeschnürt ist. Das Gate stellt also gegenüber Source und Drain jeweils eine **Diode** dar, deren **Anode** das **Gate** ist.



Ohne angelegte Spannung am Gate (Anschluss offen) fließt ein Strom, sobald eine Spannung zwischen Drain und Source anliegt. Dabei spielt die Polarität zunächst keine Rolle, d.h. Source und Drain sind vertauschbar! Und auch heute gibt es noch Typen, die diese Eigenschaft explizit haben: BF244 und BF246 bzw. mit anderer Anschlussfolge BF245 und BF247. Die im Bild gezeigte Polarität ist aber der Normalfall beim n-Kanal-Typ.

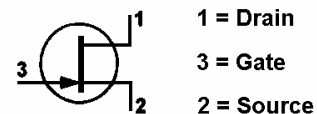
Wenn man an das Gate eine - gegenüber dem Source-Anschluss - negative Spannung anlegt, wird die Sperrschicht zwischen Gate und n-Kanal verbreitert und bei genügend negativer Spannung (einige Volt) der Stromfluss zum Drain komplett unterbunden. Diese Steuerung ist in der Wirkung (nicht im Mechanismus) mit dem der Elektronenröhre gut vergleichbar.

Bei einer positiven Spannung am Gate wird der Stromfluss zunächst verstärkt bis schließlich beim Erreichen der Schließenspannung (ca. 0,6 Volt) ein starker Gatestrom einsetzt. Dieser Betriebsfall ist in aller Regel verboten und kann den FET zerstören.

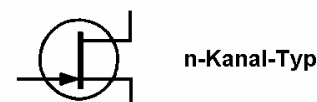


Der **p-Kanal-J-FET** unterscheidet sich vom n-Kanal-Typ nur darin, dass der Kanal p-dotiert ist, am Drain eine negative Betriebsspannung liegt und zur Steuerung am Gate eine positive Spannung benötigt wird, denn das n-dotierte Gate stellt gegenüber Source bzw. Drain die Katode der Sperrschicht dar. Im Bild ist ein sogenannter Planar-p-Kanal-J-FET zu sehen, der auf einem n-leitenden Grundmaterial aufgebaut ist, das an der Funktion des Transistors aber völlig unbeteiligt ist.

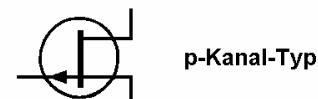
Das **Schaltungssymbol** des **Sperrschicht-Feldeffekt-Transistors (J-FET)** symbolisiert mit einem dicken Strich den **Kanal**, daran angeschlossen **Source** (Anschluss 2, unten) und **Drain** (Anschluss 1, oben) und in Höhe des Source-Anschlusses der mit einem Pfeil versehene **Gate**-Anschluss (Anschluss 3).



Zur Unterscheidung der n- und p-Kanal-Typen zeigt der Pfeil immer zur n-dotierten Zone. Das ist beim n-Kanal-Typ der Kanal und beim p-Kanal-Typ das Gate.



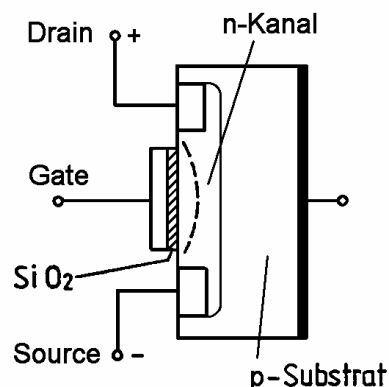
Eine "Eselsbrücke", die angibt, dass der n-Kanal-Typ mit einer positiven Betriebsspannung am Drain betrieben wird und der p-Kanal-Typ mit negativer Betriebsspannung arbeitet, lässt sich hier leider nicht angeben.



MOS- oder IG-FET

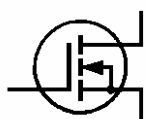
Neben dem Sperrschicht-FET gibt es auch Feldeffekt-Transistoren, deren Gate gegenüber dem Kanal vollständig isoliert ist. Sie heißen offiziell Isolated Gate Field Effekt Transistor oder **IG-FET**. Da die Isolationsschicht in der Anfangszeit ausschließlich aus einer Metall-Oxyd-Schicht bestand, hieß dieser Typ früher MOS-FET (eigentlich: Metal Oxyd Semiconductor). Diese Bezeichnung wird auch heute noch oft verwendet.

MOS-FET (IG-FET)



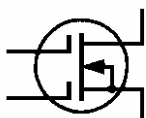
Der Aufbau eines IG-FET ähnelt dem des planaren Sperrschicht-FET. Es wird aber ein vierter Anschluss benötigt, der den Gegenpol zum Gate darstellt. Dies ist das Substrat, das in aller Regel mit dem Source-Anschluss intern verbunden ist. Und natürlich gibt es beim IG-FET auch wieder n-Kanal- und p-Kanal-Typen. Im Bild rechts ist ein n-Kanal-Typ gezeigt.

Während der Sperrschicht-FET ohne angelegte Gate-Spannung zwischen Source und Drain immer leitend ist, gibt es beim IG-FET auch Typen, die erst bei angelegter Gate Spannung leitend werden. Diese werden als Enhancement-IG-FET oder **Anreicherungs-Typ** bezeichnet. Siehe im Bild links das obere Schaltzeichen.

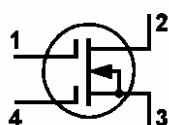


Der dem J-FET ähnliche (selbstleitende!) IG-FET heißt Depletion FET oder **Verarmungs-Typ**.

Darüber hinaus kann man auch IG-FETs mit zwei Gate-Anschlüssen bauen, die eine multiplikative Steuerung durch zwei Steuerspannungen ermöglichen, was sowohl für Modulatorschaltungen wie auch für logische (digitale) Funktionen verwendbar ist (im Bild links mitte und unten als Verarmungs-Typ).



Auf Grund dieser Besonderheiten gibt es beim IG-FET mit einem Gate vier verschiedene Schaltungssymbole. Beim nicht selbst leitenden Anreicherungs-Typ wird der Kanal mit zwei Unterbrechungen dargestellt (im Bild oben), beim Verarmungstyp ist der Kanal durchgängig wie beim J-FET.



Im Gegensatz zum J-FET bekommt nicht das Gate sondern der Substratan-schluss das Pfeil-Symbol: Die Spitze zeigt zum n-dotierten Material; also beim n-Kanal-Typ zum Kanal und beim p-Kanal-Typ in Richtung Substratan-schluss.

Die 4 Anschlüsse im unteren Symbol sind: 1 = Gate 2, 2 = Drain, 3 = Source mit intern angeschlossenem Substrat, 4 = Gate 1

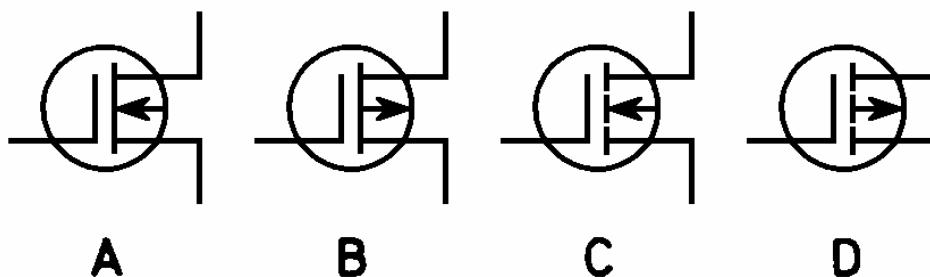
IG-Feldeffekttransistoren sind das Standard-"Bauelement" der Integrierten Schaltungen, bei denen viele Transistoren auf einem einzigen Substrat vereinigt sind und auch untereinander zu ganzen Schaltungen verbunden sind.

Dabei unterscheidet man drei Hauptgruppen:

- analoge IC (Integrierte Schaltungen) wie z.B. Operationsverstärker und Modulatoren,
- digitale logische IC wie Gatter, Flip-Flop, Zähler, arithmetische Rechenwerke und
- Mikroprozessoren und zugehörige Schaltungen (Speicher, Interface-Schaltungen).

Hier den Überblick zu behalten ist sogar dem Fachmann fast unmöglich, weil beinahe täglich neue Schaltungen auf den Markt kommen. So gibt es ganze Empfänger oder auch Transceiver (Mobiltelefon!) auf einem Chip! Dem bastelnden Funkamateurl steht also theoretisch eine riesige Palette an Bauteilen zur Verfügung - doch leider sind die Anschlüsse bei den hochintegrierten ICs meist so winzig, dass man sie mit einem normalen LötKolben nicht mehr bearbeiten kann!

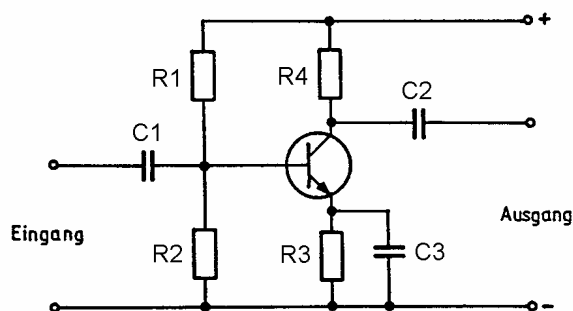
Zum Schluss dieser Lektion noch die Zusammenstellung der Schaltsymbole der **IG-FETs**:



n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal
Verarmungs-Typ		Anreicherungs-Typ	

Dimensionierung von zwei Transistorschaltungen

Für die beiden Schaltungen sind gegeben: $U_{Batt} = +12\text{ V}$, $f_g \leq 50\text{ Hz}$, $R_{Last} = 10\text{ k}\Omega$ und



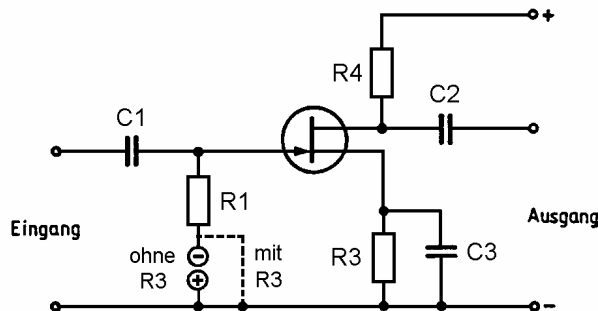
BC 107, $I_C = 5\text{ mA}$, $U_E = +0,9\text{ V}$, $U_C = +7\text{ V}$

BC 107: $\beta = 180$, $U_{BE} = 0,7\text{ V}$ bei $I_B = 50\text{ }\mu\text{A}$

R3 = R4 = C2 =

R2 = R1 = C1 =

C3 =



$I_D = 2\text{ mA}$ bei $U_{GS} = -0,94\text{ V}$, $U_D = +7,6\text{ V}$

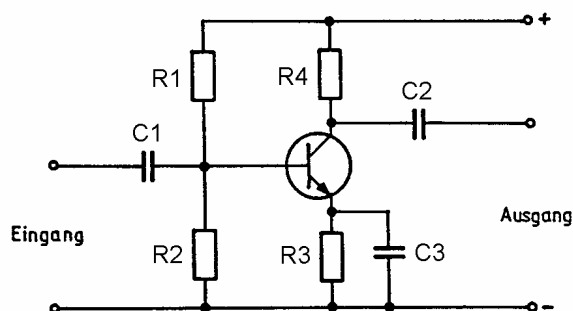
($I_G < 50\text{ nA}$, $R1 \leq 1\text{ M}\Omega$)

R3 = R4 = C2 =

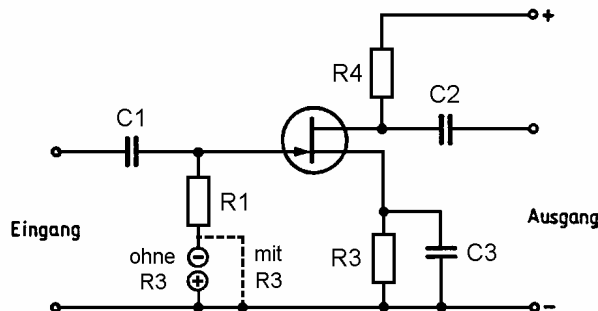
R1 = C1 = C3 =

Dimensionierung von zwei Transistorschaltungen

Für die beiden Schaltungen sind gegeben: $U_{\text{Batt}} = +12 \text{ V}$, $f_g \leq 50 \text{ Hz}$, $R_{\text{Last}} = 10 \text{ k}\Omega$ und



BC 107, $I_C = 5 \text{ mA}$, $U_E = +0,9 \text{ V}$, $U_C = +7 \text{ V}$
 BC 107: $\beta = 180$, $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ bei $I_B = 50 \mu\text{A}$
 $R_3 = 180 \Omega$ $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ $C_2 = 330 \text{ nF}$
 $R_2 = 3,3 \text{ k}\Omega$ $R_1 = 22 \text{ k}\Omega$ $C_1 = 2,2 \mu\text{F}$
 $C_3 = 22 \mu\text{F}$



$I_D = 2 \text{ mA}$ bei $U_{GS} = -0,94 \text{ V}$, $U_D = +7,6 \text{ V}$
 ($I_G < 50 \text{ nA}$, $R_1 \leq 1 \text{ M}\Omega$)
 $R_3 = 470 \Omega$ $R_4 = 2,2 \text{ k}\Omega$ $C_2 = 330 \text{ nF}$
 $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ $C_1 = 3,3 \text{ nF}$ $C_3 = 10 \mu\text{F}$

Transistor Seite 5 - Lösungsweg

Schaltung mit npn-Transistor

$R_3 = 0,9 \text{ V} / 5 \text{ mA} = 180 \text{ Ohm}$
 $R_4 = (12-7)\text{V} / 5 \text{ mA} = 1 \text{ kOhm}$
 $C_2 = 1 / (2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot (1\text{k} + 10\text{k})) = 290 \text{ nF} \rightarrow 330 \text{ nF}$
 $C_3 = 1 / (2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 180 \text{ Ohm}) = 17,7 \mu\text{F} \rightarrow 22 \mu\text{F}$
 Strom im Basisteiler ca. $10 \cdot I_B \rightarrow 0,5 \text{ mA}$
 $U_B = 0,9 + 0,7 = 1,6\text{V}$
 $R_2 = 1,6\text{V} / 0,5\text{mA} = 3,2 \text{ kOhm} \rightarrow 3,3 \text{ kOhm}$
 $I_{\text{Basisteiler}} = 1,6\text{V} / 3,3 \text{ kOhm} = 0,48\text{mA}$
 $R_1 = (12-1,6) \text{ V} / 0,48\text{mA} = 21,7 \text{ kOhm} \rightarrow 22 \text{ kOhm}$
 Genau genommen müsste für R_1 mit $0,53 \text{ mA}$ gerechnet werden, was $19,6 \text{ kOhm}$ ergibt $\rightarrow 18 \text{ kOhm}$
 $R_1 // R_2 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 2,87 \text{ kOhm}$
 $C_1 = 1 / (2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 2,87 \text{ kOhm}) = 1,1 \mu\text{F} \rightarrow 2,2 \mu\text{F}$

Rechenwert

Formel

$2,89373\text{E-}07$	$=1/(2\pi \cdot 3,14159 \cdot 50 \cdot 11000)$
$1,76839\text{E-}05$	$=1/(2\pi \cdot 3,14159 \cdot 50 \cdot 180)$
$0,484848485$	$=1,6 / 3,3$
$21,66666667$	$=10,4/0,48$
$2869,565217$	$=1/(1/3300 + 1/22000)$
$1,10909\text{E-}06$	$=1/(2\pi \cdot 3,14159 \cdot 50 \cdot 2870)$

FET-Schaltung

$R_3 = 0,94\text{V} / 2 \text{ mA} = 470 \text{ Ohm}$
 $R_4 = (12 - 7,6)\text{V} / 2 \text{ mA} = 2,2 \text{ kOhm}$
 $R_1 = 1 \text{ MOhm}$
 $C_1 = 1 / (2\pi \cdot 50 \cdot 1\text{M}) = 3,2 \text{ nF} \rightarrow 3,3 \text{ nF}$
 $C_2 = 1 / (2\pi \cdot 50 \cdot (2200+10000)) = 260 \text{ nF} \rightarrow 330 \text{ nF}$
 $C_3 = 1 / (2\pi \cdot 50 \cdot 470) = 6,8 \mu\text{F} \rightarrow 10 \mu\text{F}$

$3,1831\text{E-}09$	$=1/(2\pi \cdot 3,14159 \cdot 50 \cdot 1000000)$
$2,6091\text{E-}07$	$=1/(2\pi \cdot 3,14159 \cdot 50 \cdot 12200)$
$6,77256\text{E-}06$	$=1/(2\pi \cdot 3,14159 \cdot 50 \cdot 470)$