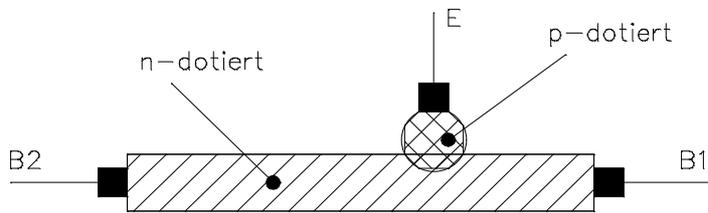


Der Unijunction - Transistor

Der Unijunctiontransistor ist ein Silizium-Halbleiter-Bauelement. In ein schwach N-dotiertes Ausgangsmaterial wird eine P-leitende Zone eindiffundiert (Abb. 2.2.1).

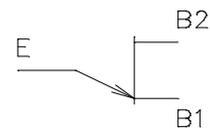
Die P-Zone bildet einen Emitter (E), während die schwach dotierte N-Zone zwei Anschlüsse (an beiden Enden je einen) erhält; sie werden Basis 1 (B1) und Basis 2 (B2) genannt. Unijunctiontransistoren sind deshalb auch unter der Bezeichnung "Doppelbasistransistoren" bekannt. Das Schaltsymbol ist ebenfalls in Abb. 2.2.1 dargestellt.

Bild 2.2.1



[AE2-2-1.SKD]

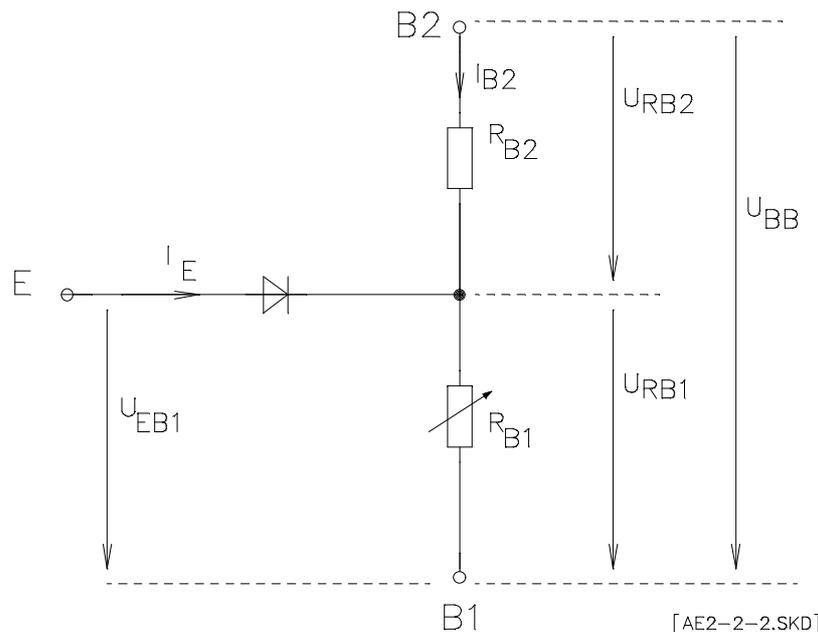
Aufbau des UJT



Schaltsymbol des UJT

Anhand eines Ersatzschaltbildes und der sich daraus ergebenden Kennlinie des UJT wird die Wirkungsweise erklärt.

Bild 2.2.2



[AE2-2-2.SKD]

Die N-Zone zwischen beiden Basisanschlüssen bildet einen hochohmigen Widerstand, den man sich an der Stelle der eindiffundierten Emitterzone aufgeteilt vorstellen kann. Die beiden Anteile werden in den folgenden Betrachtungen R_{B1} und R_{B2} genannt.

Der PN-Übergang zwischen Emitter und Basisbahn ist im Ersatzschaltbild (Abb. 2.2.2) als Diode dargestellt.

Für das elektrische Verhalten sind zwei getrennt zu erklärende Vorgänge verantwortlich.

1.) Legt man zwischen E und B1 eine Spannung U_{EB1} so an, daß die Diode durchlässig wird (+ an E), so setzt ein Emitterstrom I_E ein, der den stromdurchflossenen Teil der Basisbahn mit Ladungsträgern wie bei einem normalen Transistor anreichert. R_{B1} nimmt damit ab. Im Ersatzschaltbild ist deshalb R_{B1} als veränderlicher Widerstand dargestellt.

2.) Legt man bei offenem Emitter zwischen B1 und B2 die Interbasisspannung U_{BB} an (+ an B2), so teilt sich diese in die beiden Spannungsabfälle U_{RB1} und U_{RB2} auf. Die Spannungsabfälle verhalten sich dabei wie die Widerstände R_{B1} und R_{B2} :

$$\frac{U_{RB1}}{U_{RB2}} = \frac{R_{B1}}{R_{B2}} \quad \text{daraus folgt:} \quad U_{RB1} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} * U_{BB}$$

Der Widerstandsteilungsfaktor wird für UJT bei offenem Emitter allgemein mit dem Formelbuchstaben η angegeben. Es ist also:

$$\eta = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad U_{RB1} = \eta * U_{BB}$$

Bei einer Ansteuerung des UJT am Emitter und gleichzeitig anliegender Spannung U_{BB} muß die Steuerspannung U_{EB1} um den Spannungsabfall U_{RB1} größer sein als die Schleusenspannung U_D der Emitterdiode, damit die Diode durchlässig werden kann. Die für den Durchbruch erforderliche Größe von U_{EB1} wird Höckerspannung U_P genannt.

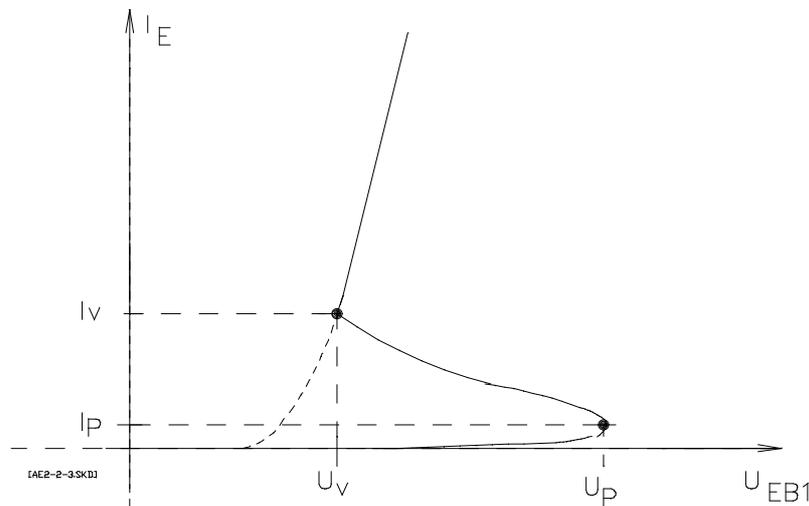
$$U_P = U_D + U_{RB1} = \eta * U_{BB} + U_D$$

Der einsetzende Emitterstrom und die damit verursachte Verringerung von R_{B1} (Vorgang a) läßt den Spannungsabfall U_{RB1} absinken und I_E ansteigen.

Der steigende Emitterstrom injiziert nun Ladungsträger in zunehmendem Maße, bis die Basisbahn gesättigt und damit R_{B1} nahezu 0 geworden ist.

Der geschilderte Vorgang führt zu einem schnellen Zusammenbrechen der Spannung U_{RB1} . In der Kennlinie des UJT (Abb. 2.2.3) ist die Abhängigkeit zwischen U_{EB1} und I_E dargestellt.

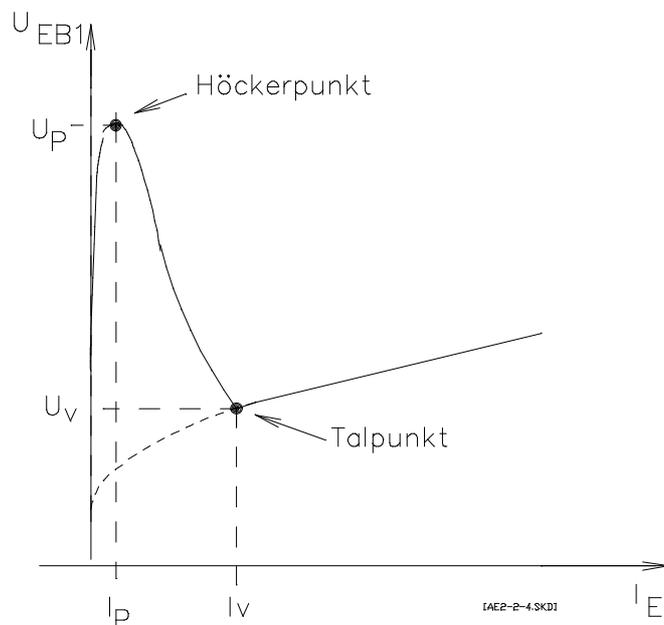
Bild 2.2.3



Die Verringerung von R_{B1} verursacht eine Abnahme der Spannung U_{EB1} bis auf den Wert der sog. Talspannung U_V . Von hier ab geht die Abhängigkeit zwischen Emitterstrom und Emitter-Basis-Spannung in eine Diodenkennlinie über; der Emitterstrom steigt also sehr steil an.

In der Praxis wird die Kennlinie des UJT meist mit vertikaler Spannungsachse und horizontaler Stromachse dargestellt (Abb.2.2.4). Aus dieser Darstellungsform sind auch die beiden Begriffe Höckerpunkt (pick) und Talpunkt (valley) abgeleitet.

Bild 2.2.4



Hat die angelegte Spannung U_{EB1} von 0 ausgehend noch nicht den Wert U_{RB1} erreicht, so fließt nur ein sehr kleiner Diodenreststrom, der negativ gerichtet ist (Sperrstrom), weil $U_{EB1} < U_{RB1}$ und damit die Diode in Sperrichtung vorgespannt ist.

Überschreitet die angelegte Spannung U_{EB1} den Wert der Höckerspannung U_P so wird der UJT leitend, und die Spannung bricht bis auf die Talspannung U_v zusammen. Der Emitterstrom steigt steil an und wird erst dann unterbrochen, wenn die angelegte Spannung kleiner als die Talspannung U_v wird.

Die Kennlinie des UJT zeigt eine ähnliche Charakteristik wie die einer Vierschichtdiode: Die Spannung in Flußrichtung steigt zunächst ohne nennenswerten Stromfluß bis auf einen Maximalwert (U_P beim UJT und U_{sch} bei der Vierschichtdiode) an. Erst beim Erreichen dieses Wertes wird das Bauteil niederohmig, d. h., ein Stromfluß setzt ein, und die Spannung bricht auf einen wesentlich geringeren Wert zusammen. Deshalb entsprechen sich in etwa auch die weiteren Kenndaten bei beiden Bauelementen.

Daraus geht hervor - und das zeigt auch der nächste Abschnitt - daß UJT wie Vierschichtdioden für Kippgeneratoren verwendet werden können.

Die Höckerspannung U_P des UJT ist, wie bereits bekannt, abhängig von der Schleusenspannung U_D der Emitterdiode, vom inneren Teilungsfaktor n und von der Interbasisspannung U_{BB} .

$$U_P = U_D + \eta * U_{BB}$$

In dieser Gleichung sind U_D und η feststehende, vom UJT-Typ abhängige Daten, während U_{BB} variabel ist. Deshalb kann bei einem UJT (im Gegensatz zu einer Vierschichtdiode) die zum Übergang in den niederohmigen Zustand erforderliche Spannung U_P in bestimmten Grenzen beeinflußt werden. Ein UJT wird daher manchmal auch als programmierbare Vierschichtdiode bezeichnet.

Beispiel: Ein bestimmter Silizium-UJT wird mit einer Interbasisspannung $U_{BB} = 12\text{ V}$ betrieben. Aus dem Datenblatt geht hervor, daß bei der vorliegenden Umgebungstemperatur und der gewählten Interbasisspannung $\eta = 0,7$ ist. Damit läßt sich die Höckerspannung U_P errechnen, wenn man für $U_D = 0,6\text{ V}$ setzt, da es sich um einen Silizium-PN-Übergang handelt. Es ist:

$$U_P = 0,6\text{ V} + 0,7 * 12\text{ V} = 9\text{ V}$$

Wird ein UJT durch Anlegen von U_P an den Emitter leitend gesteuert, dann steigt auch der von der Interbasisspannung U_{BB} getriebene Basisstrom I_{B2} an, da dieser von R_{B1} und R_{B2} abhängt und R_{B1} auf nahezu 0 absinkt.

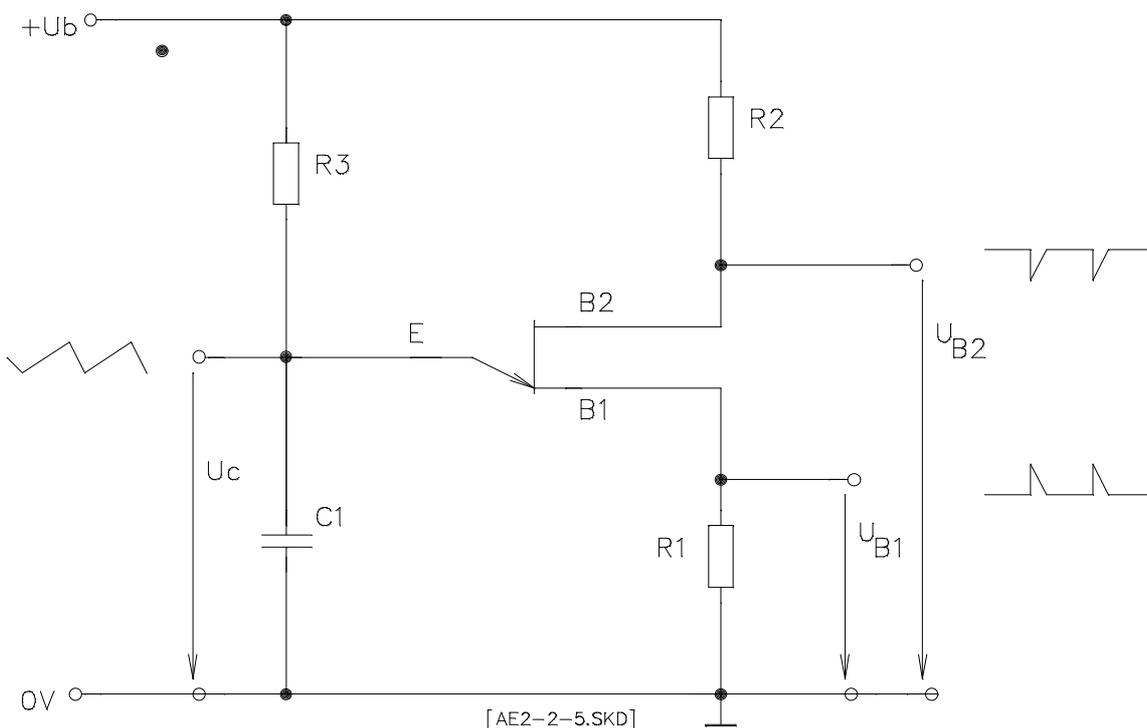
Anwendung des UJT

Aufgrund ihres Kippverhaltens werden Unijunctiontransistoren vorwiegend zur Nadelimpuls- und Sägezahnzeugung, also in Kippgeneratoren eingesetzt

Einfacher Kippgenerator

Der UJT läßt sich als Kippgenerator betreiben, wenn die Emitterspannung U_{EB1} durch Ladung eines Kondensators erzeugt wird. In Abb. 2.2.5 wird ein Kondensator $C1$ über $R3$ aus der Speisespannung aufgeladen. Zum Kondensator liegt die Emitter-Basis1-Strecke des UJT parallel.

Bild 2.2.5



Solange die Kondensatorspannung U_c noch kleiner als die Höckerspannung U_P ist, bleibt der UJT gesperrt. Es ist dann $I_E = 0$.

Über $R1$ und $R2$ fließt ein kleiner Basisstrom I_{B2} , dessen Größe von der Größe des Widerstandes $R2$, vom Interbasiswiderstand ($R_{BB} = R_{B1} + R_{B2}$) des UJT, von der Größe des Widerstandes $R1$ und von der Speisespannung U_b abhängt:

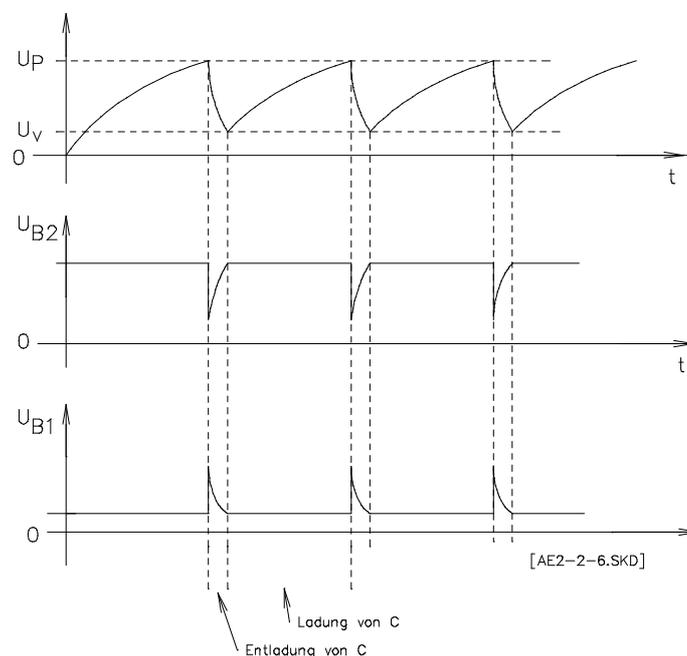
$$I_{B2} = \frac{U_b}{R1 + R2 + R_{BB}}$$

Erreicht U_c den Wert U_P , dann wird der UJT leitend. Durch den nun einsetzenden Emitterstrom I_E wird der Kondensator $C1$ sehr schnell über die niederohmige Emitter-Basis1-Strecke bis auf die Talspannung U_v entladen. Danach geht der UJT wieder in den Sperrzustand über, bis $C1$ erneut auf U_P aufgeladen ist. Am Emitter entsteht durch die ständig sich wiederholenden Lade- und Entladevorgänge eine Sägezahnspannung U_c (Abb. 2.2.6, oberes Diagramm), die am Ausgang E abgegriffen werden kann.

Während der Entladephasen, also wenn der UJT leitend ist, steigt der Basisstrom I_{B2} kurzzeitig auf I_{B2max} an, weil der Anteil R_{B1} des Interbasiswiderstandes auf nahezu 0 verringert ist. Der dadurch erhöhte Spannungsabfall an R_2 ist ein negativer Nadelimpuls am Ausgang B2 (siehe Abb. 2.2.6, mittleres Diagramm mit U_{B2}).

Der ansteigende Basisstrom einerseits und der Entladestrom des Kondensators andererseits lassen den Spannungsabfall U_{B1} an R_1 ansteigen. Aus diesem Grund entstehen am Ausgang B1 positive Nadelimpulse (Abb. 2.2.6, unteres Diagramm).

Bild 2.2.6



Für die Dimensionierung der Schaltung (Abb. 2.2.5) gelten folgende Gesichtspunkte:

- R_1 begrenzt den Kondensator-Entladestrom auf für den UJT unkritische Werte. Für eine kurze Entladezeit sollte seine Größe R_1 möglichst klein sein.
- R_2 dient als Arbeitswiderstand beim Betrieb der Schaltung als Nadelimpulsgenerator. Gleichzeitig kompensiert er bei richtiger Dimensionierung die temperaturbedingten Abweichungen des inneren Teilungsfaktors n .
- R_3 und C_1 bestimmen die Frequenzen der Sägezahn-, bzw. Impulsspannung. Die Größe R_3 des Widerstandes R_3 darf nicht zu klein werden, da sonst der UJT direkt durch die Speisespannung leitend wird und evtl. durch Überlastung zerstört werden kann. Der durch R_3 fließende maximale Strom I_{R3max} muß in jedem Falle kleiner als der Talstrom I_V des UJT sein.

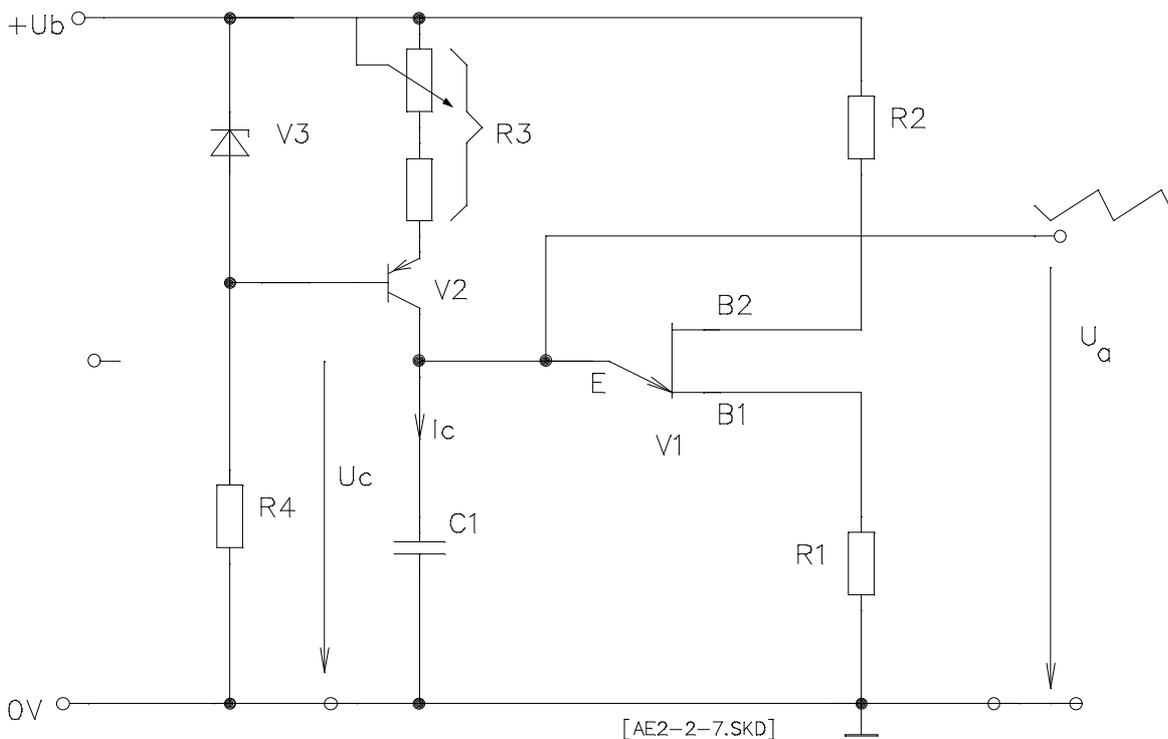
$$R_3 > \frac{U_b - U_v}{I_V}$$

Sägezahngenerator mit linearem Anstieg

Bei der Schaltung nach Abb. 2.2.5 zeigt die ansteigende Flanke der erzeugten Sägezahnspannung wie beim Sägezahngenerator mit Vierschichtdiode einen gekrümmten Verlauf. Die Ursache liegt auch hier im Prinzip der Ladung mit konstanter Spannung.

Für einen trotz zunehmender Ladung linearen Spannungsanstieg am Kondensator ist jedoch eine stromkonstante Speisung des Ladestromkreises erforderlich. In der folgenden Schaltung wird der sägezahnbestimmende Kondensator C1 durch den konstanten Kollektorstrom eines vorgeschalteten Transistors V2 aufgeladen (Abb. 2.2.7).

Bild 2.2.7

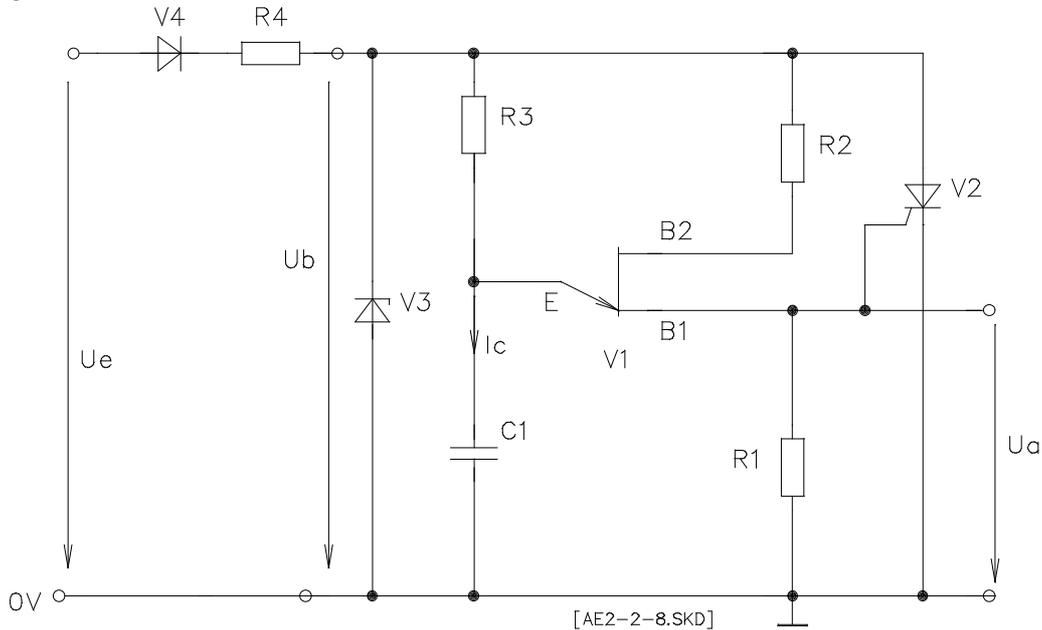


Die Beschaltung und die Wirkungsweise der Transistorstufe entspricht der geschilderten Schaltung. Durch R3 wird die Größe des konstanten Stroms I_c und damit die Frequenz der erzeugten Sägezahnspannung eingestellt.

Synchronisierbarer Impulsgenerator

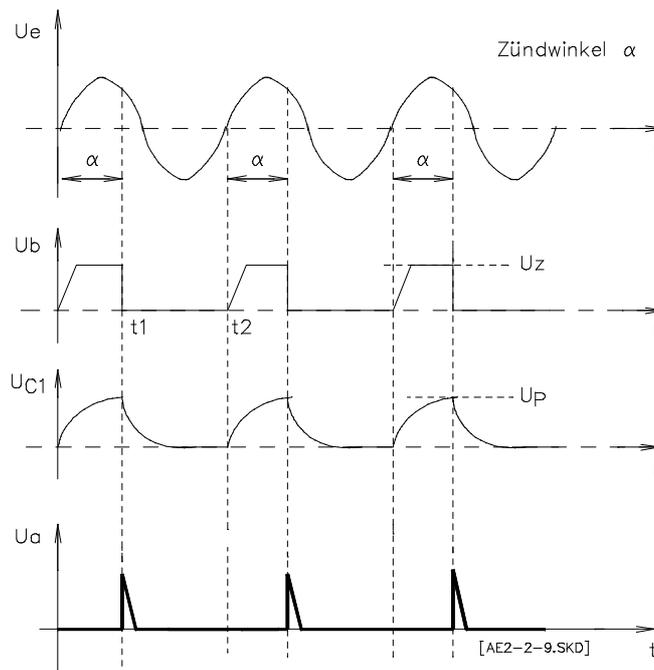
Zur Phasenanschnittsteuerung mit Thyristoren und TRIACs werden Nadelimpulse benötigt, die mit der Netz-Wechselspannung synchron liegen. Häufig werden solche Nadelimpulsgeneratoren mit einem UJT realisiert. Abb. 2.2.8 zeigt eine Schaltung für netzsynchrone und im Phasenwinkel einstellbare positive Nadelimpulse.

Bild. 2.2.8



Der Kippgenerator selbst entspricht der im Bild 2.2.5 beschriebenen Schaltung. Die Synchronisierbarkeit erhält die Schaltung durch die besondere Versorgungsspannung U_b . U_b wird durch Einweggleichrichtung mit V4 und Spannungsbegrenzung mit der Z-Diode V3 aus der Eingangswechselspannung U_e gebildet. Solange der Thyristor V2 noch nicht gezündet ist, liegt am Kippgenerator während der positiven Halbwellen $U_b = U_z$.

Bild 2.2.9



C1 kann sich bis auf den Wert U_P aufladen (Abb. 2.2.9). Durch Leitendwerden des UJT entsteht in der bekannten Weise ein positiver Nadelimpuls U_a am Ausgang. Mit diesem Impuls wird auch der Thyristor leitend. Er schließt die Speisespannung kurz (Zeitpunkt t_1 in Abb. 2.2.9). Damit ist $U_b \approx 0V$.

Es können keine weiteren Impulse erzeugt werden. Bis zum Ende der Halbwelle bleibt V2 leitend. Während dieser Zeit und der nachfolgenden negativen Halbwelle bleibt der Generator spannungs- und damit wirkungslos. Mit Beginn der nächsten positiven Halbwelle (t_2 in Abb. 2.2.9) liegt erst wieder Speisespannung an; die beschriebenen Vorgänge wiederholen sich nun.

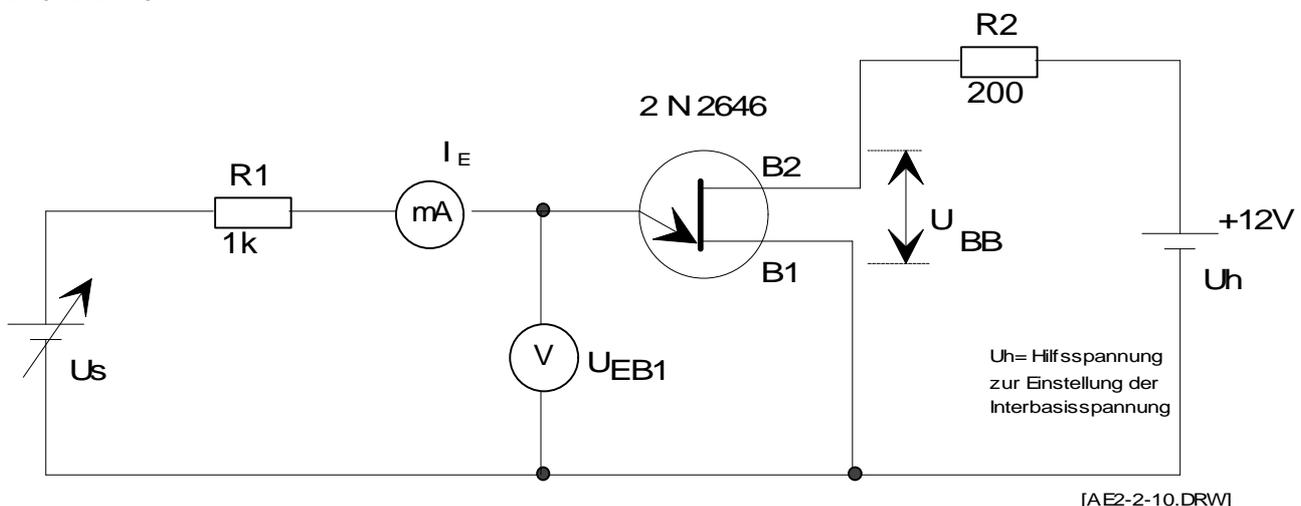
Wie Abb. 2.2.9 zeigt, liegen die Nadelimpulse zur eingangsseitigen Wechselfspannung synchron. Der Phasenwinkel α zwischen den positiven Nulldurchgängen der Eingangsspannung und den Impulsen ist bei allen Schwingungen gleich. Er kann durch R_3 eingestellt werden. Je größer der Wert von R_3 wird, um so größer wird auch α .
 Nach dieser mehr theoretischen Betrachtung des Bauelementes wollen wir uns nun den UJT in einem praktischen Beispiel und danach in mehreren Anwendungen ansehen.

Nach dieser mehr theoretischen Betrachtung des Bauelementes wollen wir uns nun den UJT in einem praktischen Beispiel und danach in mehreren Anwendungen ansehen.

Bei der Betrachtung der Kennlinie eines UJT ist eine gewisse Ähnlichkeit mit der Kennlinie einer Vierschichtdiode nicht zu verkennen. Allerdings liegt bei dieser die Schaltspannung fest, beim UJT hingegen läßt sich die Schaltspannung durch die Interbasisspannung U_{BB} beeinflussen.

Anhand eines einfachen Versuches soll nun die Kennlinie und die grundsätzliche Arbeitsweise eines UJT nachgeprüft werden.

Bild 2.2.10



Der Widerstand R_1 begrenzt den Emitterstrom, nachdem der UJT gezündet hat. Wir haben die Kennlinie des UJT bei verschiedenen Spannungen U_{BB} aufgenommen; sie sind im folgenden Bild 2.2.11 dargestellt.

In unserem Versuch erhalten wir mit einer Interbasisspannung $U_{BB} = 12V$ eine Höckerspannung von 8,4V.

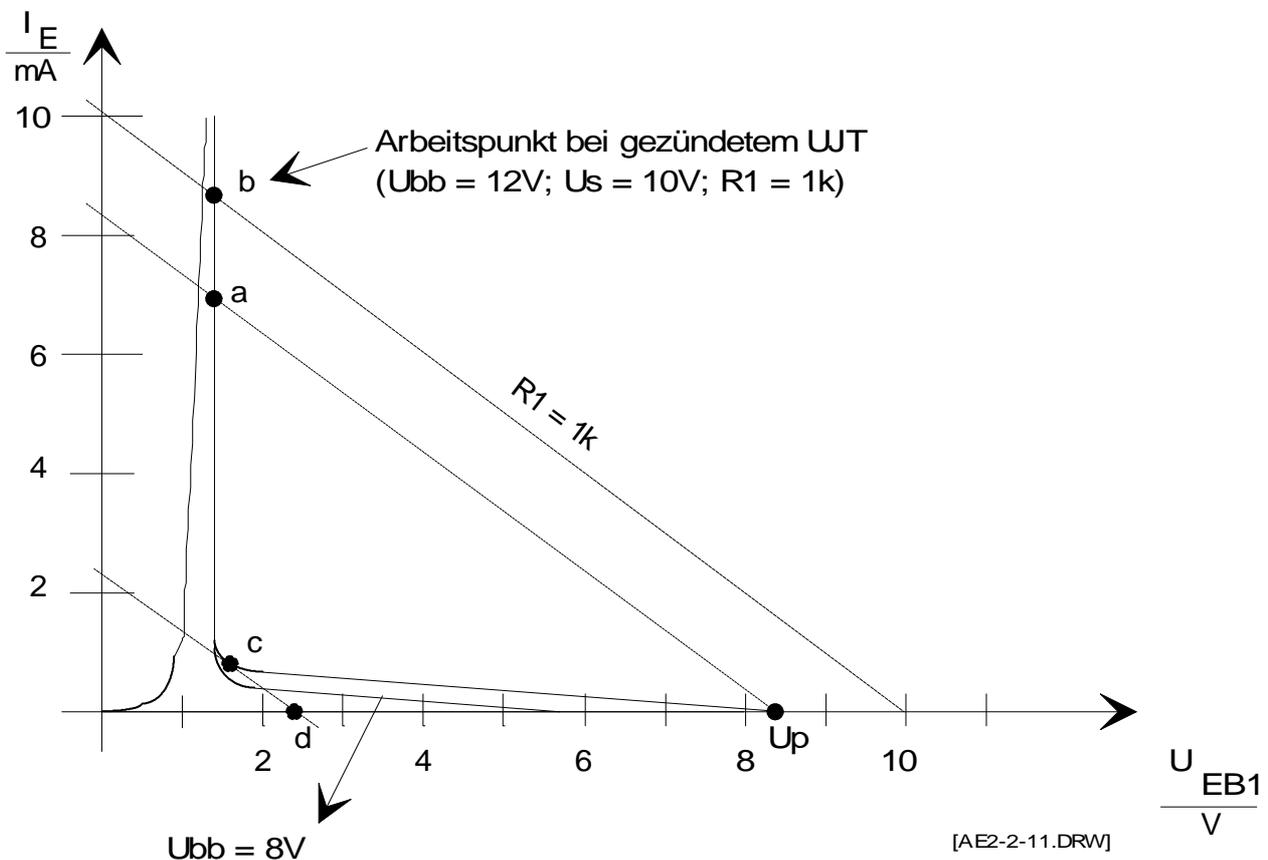
Die Speisespannung U_s erhöhen wir langsam. Solange $U_{EB1} < U_p$ ist, fließt praktisch kein Emitterstrom.

Wird $U_{EB1} = U_p$, so zündet der UJT und der Emitterstrom springt auf ca. 7,2mA; gleichzeitig bricht U_{EB1} auf ca. 1,4V zusammen (Punkt a der Kennlinie).

Erhöhen wir die Spannung U_s auf 10V, so steigt I_E auf ca. 8,7mA, U_{EB1} verändert sich kaum (Punkt b der Kennlinie).

Vermindern wir nun die Spannung U_s wieder, so folgt der Arbeitspunkt der Kennlinie bis zur Talspannung U_v (Punkt c).

Bei weiterer Verminderung springt er dann zum Punkt d ($U_{EB1} = 2,2V$, $I_E = 0mA$); der UJT ist wieder hochohmig.



Die nachstehende Tabelle zeigt einige typische Werte und Grenzwerte des UJT 2 N 2646, der auch bei uns verwendet wird.

Größe	Einheit	min.	typ.	max.
R _{bb} = R _{b1} + R _{b2}	kOhm	4,7	7	9,1
n		0,56	0,65	0,75
I _p	uA		0,4	5
U _{bb}	V			30
I _v (bei U _{bb} =20V)	mA	4	6	

Unijunktionstransistoren werden vorwiegend in Impulsgeneratorschaltungen verwendet. Um die Frequenz und die Amplitude der Ausgangsspannung unabhängig von der Temperatur konstant zu halten, muß der Höckerpunkt U_p stabilisiert werden. Für die Temperaturabhängigkeit des UJT sind die inneren Bahnwiderstände R_{B1} und R_{B2} und der PN - Übergang maßgebend. Das Spannungsteilverhältnis ändert sich bei Temperaturänderungen jedoch nicht, da ja beide Bahnwiderstände proportional gleich ihren Widerstandswert verändern.

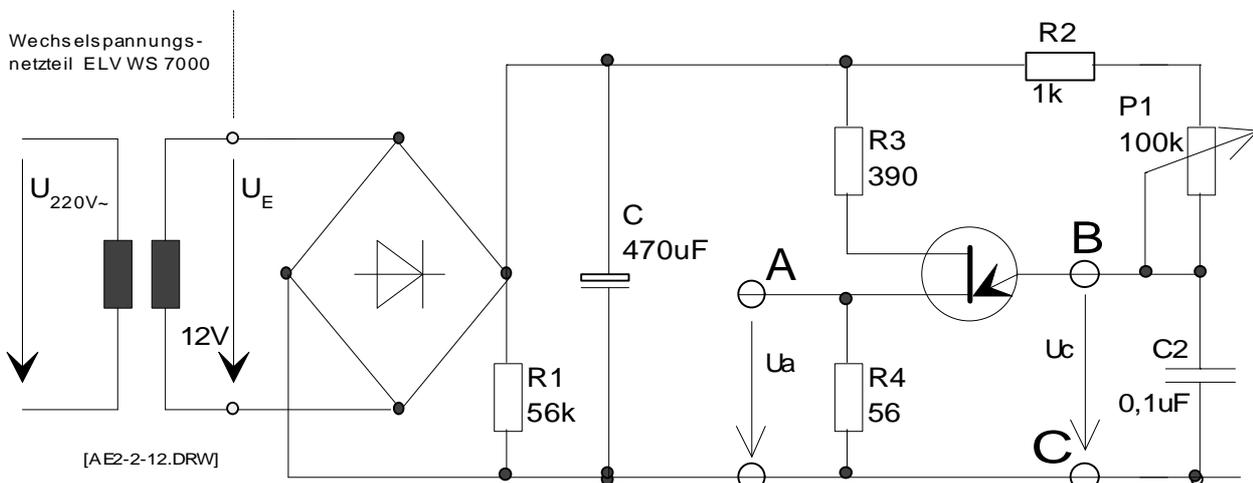
Jedoch sinkt mit steigender Temperatur die Schleusenspannung U_D des PN-Überganges, was gleichzeitig eine Verringerung der Höckerspannung bedeutet. Dem versucht man durch Einbau des Widerstandes R₂ entgegenzuarbeiten. Gleichzeitig dient R₂ aber auch als Arbeitswiderstand der Schaltung.

R₂ läßt sich annäherungsweise nach der folgenden Formel berechnen:

$$R_2 = \frac{0,7V * R_{BB}}{\eta * U_{BB}}$$

In der Praxis nimmt man Werte zwischen 150Ω und 500Ω. Nun soll eine solche Schaltung untersucht werden.

Bild 2.2.12



Bauen Sie die Schaltung nach Bild 2-2-12 auf! Verwenden Sie für P1 ein stufig einstellbares Potentiometer!

2 A 1 * Stellen Sie das Poti P1 so ein, daß ein Widerstand von $10\text{k}\Omega$ wirksam wird. Schließen Sie Kanal Ya an Meßpunkt A, Kanal Yb an Meßpunkt B und Masse an "C" an. Zeichnen Sie die vorhandenen Signale in Ihre Unterlagen.

2 A 2 * Berechnen Sie die Frequenz aus dem Oszilloskopbild!

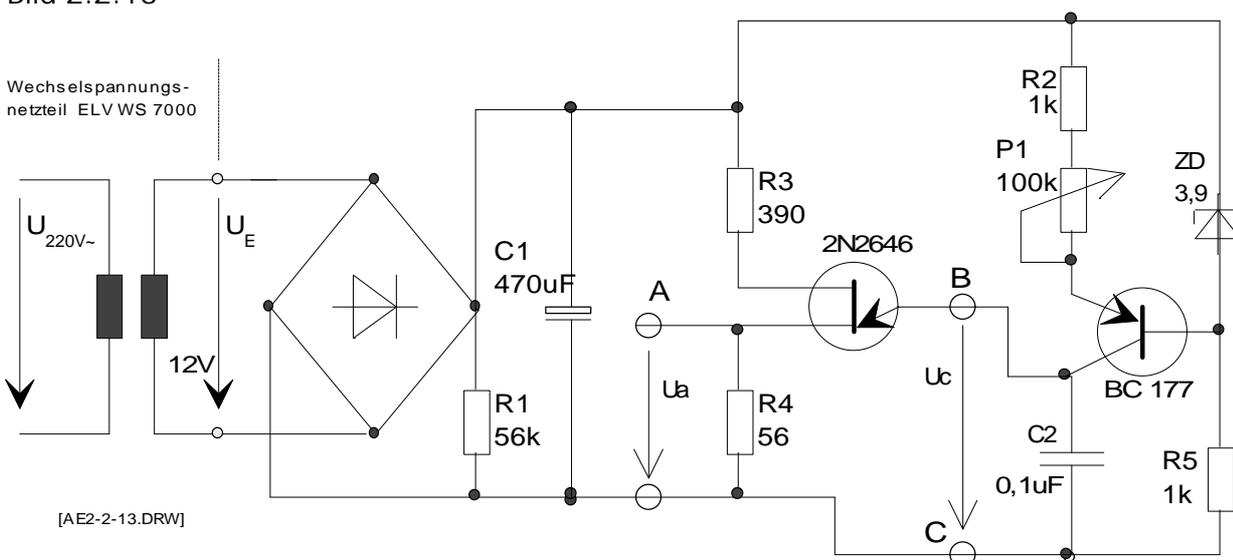
2 A 3 * Machen Sie eine Tabelle und berechnen Sie bei jeweils $10\text{k}\Omega$ Widerstandszunahme ($10 - 100\text{k}\Omega$) von P1 die jeweilige Frequenz des Generators aus dem Oszilloskopbild!

2 A 4 * Zeichnen Sie ein Diagramm, welches die Abhängigkeit der Frequenz vom eingestellten Widerstand P1 darstellt. ($1\text{cm} \sim 10\text{k}\Omega$!)

2 A 5 Setzen Sie für C2 die Werte " 10nF " und " 470nF " ein und berechnen Sie jeweils die minimale und maximale Ausgangsfrequenz! Was läßt sich über den möglichen Frequenzbereich dieser Generatorschaltung sagen?

Als nächstes wollen wir nun einen Sägespannungsgenerator mit linearem Anstieg untersuchen, wie er im Bild 2.2.7 auf Seite 7 dargestellt war. Verändern Sie also Ihren Schaltungsaufbau nach dem folgenden Schaltbild 2.2.13.

Bild 2.2.13



2 A 6 * Berechnen Sie zunächst den minimal und maximal möglichen Konstantstrom, den die Schaltung erzeugen kann.

2 A 7 * Welcher Strom fließt durch R5, wenn der Stromverstärkungsfaktor des BC 177 gleich 150 ist und $P = 0 \Omega$ eingestellt ist?

2 A 8 * Wiederholen Sie die Aufgaben 2 A 1 ... 2 A 4 mit der Schaltung nach Bild 2.2.13.

2 A 9 * Vergleichen Sie die Signalbilder und Meßwerte und schildern Sie kurz gleiche und ungleiche Eigenschaften.

Den in der Einführung zu diesem Kapitel vorgestellten, synchronisierbaren Sägezahngenerator werden wir hier noch nicht untersuchen, sondern uns nun der Zusammenschaltung von UJT und Thyristor widmen.