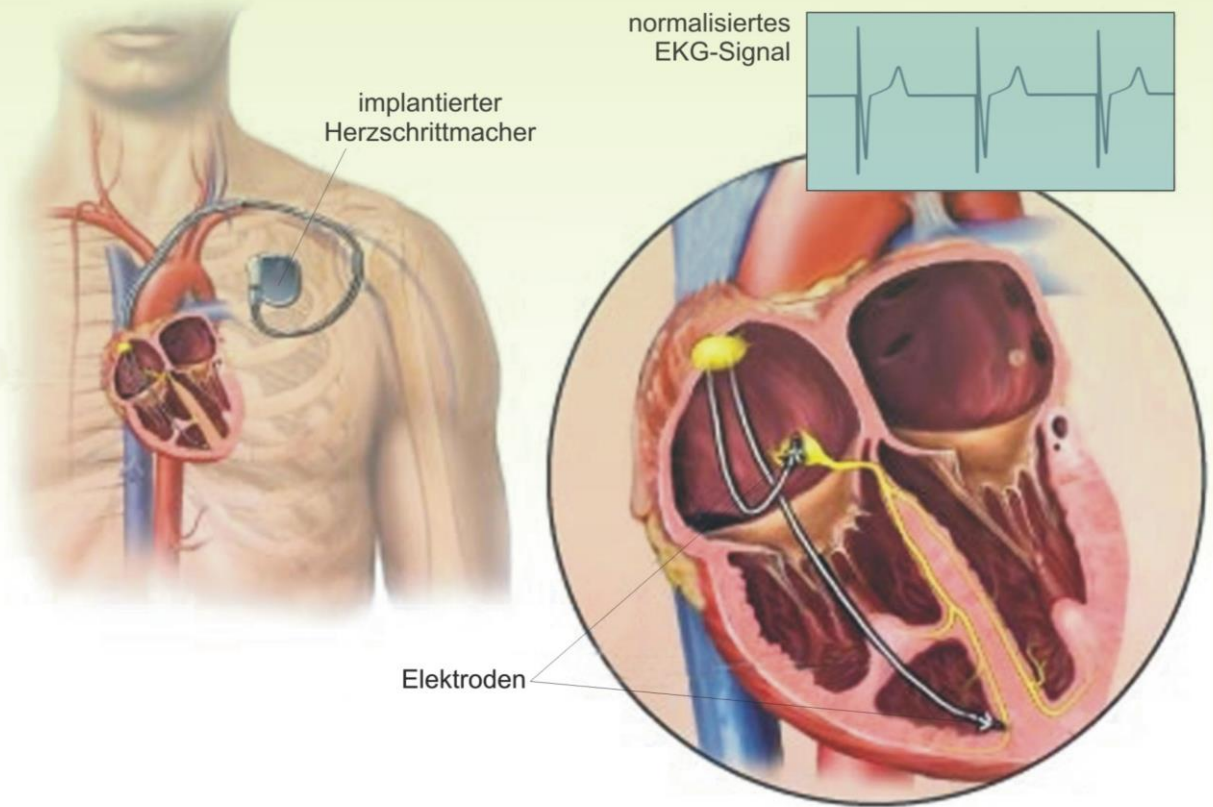
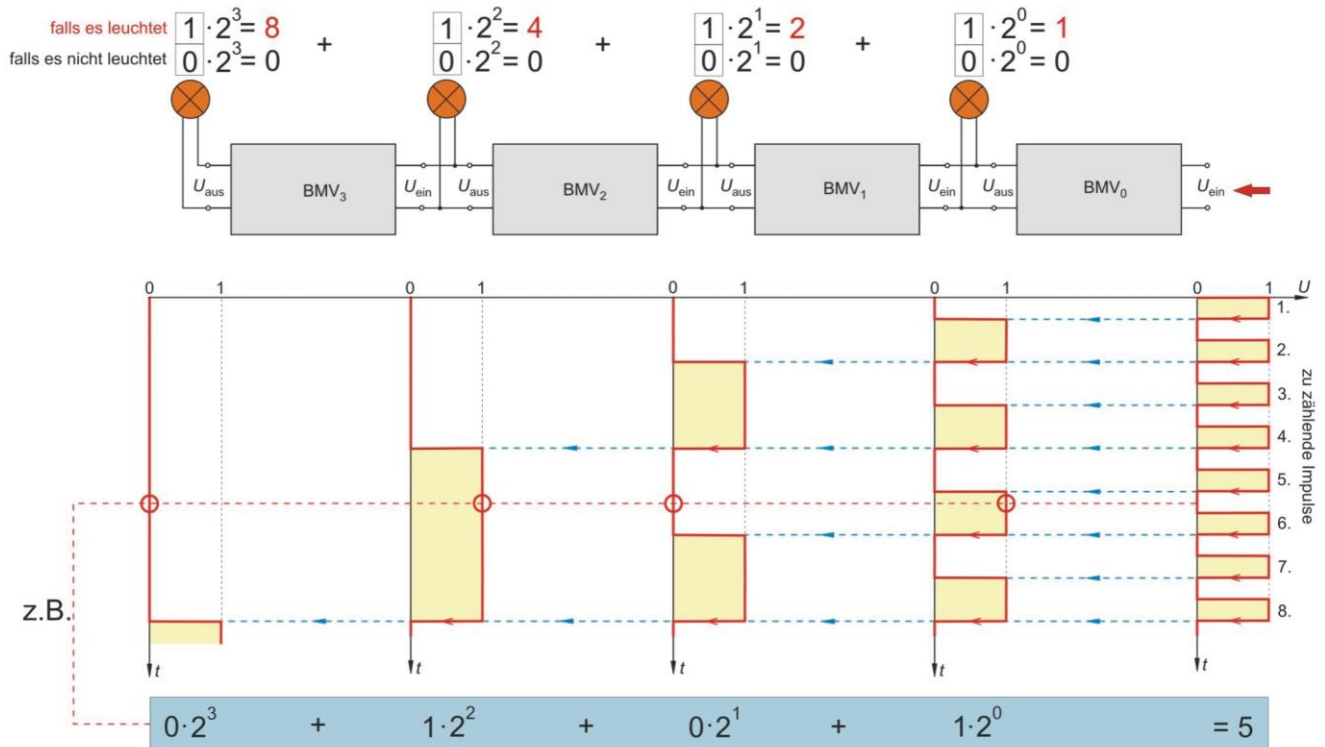


IMPULSGENERATOREN

HERSTELLUNG VON RECHTECKIMPULSEN; IMPULSZÄHLUNG



BINÄRE ZÄHLERKETTE



GRUNDBEGRIFFE

MONOSTABILER MULTIVIBRATOR (Monoflop): Ein Impulsgenerator, in dem durch einen überschwelligen aktivierenden Impuls (Trigger) ein einziger Impuls von bestimmter Dauer entsteht.

ASTABILER MULTIVIBRATOR: Ein Impulsgenerator, der eine Impulsreihe generiert. Er kann z.B. durch die Ringschaltung zweier **monostabiler Multivibratoren** realisiert werden.

BISTABILER MULTIVIBRATOR (Flipflop): Ein „Impulsgenerator“, der zur Zustandsänderung in beliebiger Richtung einen aktivierenden Impuls (Trigger) braucht. Durch Reihenschaltung mehrerer **bistabiler Multivibratoren** kann man eine binäre Zählerkette konstruieren.



In der **medizinischen Praxis** kommen elektrische Impulse sowohl in der Diagnostik als auch in der Therapie zum Einsatz. Die Antwort von Nerven und Muskeln auf Impulse von unterschiedlicher Dauer und Amplitude liefert Hinweise auf die normale oder pathologische Funktion. Elektrische Impulse werden auch oft zur Reizung der geschädigten Skelett- und Herzmuskulatur benutzt. Zum Ersatz der fehlenden oder unzureichenden Reizbildung bzw. Reizleitung werden Pacemaker und zum Beenden eines pathologisch schnellen, für den Bluttransport aber unzureichenden Herzschlages werden Defibrillatoren eingesetzt. Bei diesen Anwendungen können Impulse mit unterschiedlicher Form benutzt werden. Wir beschäftigen uns aber bei der weiteren Diskussion nur mit den sog. Rechteckimpulsen.

THEORETISCHE ZUSAMMENFASSUNG

Die sog. (digitalen) Systeme mit zwei Zuständen — mit schnellem Übergang zwischen **Ruhezustand** und **aktiviertem Zustand** — generieren charakteristisch **Rechteckimpulse**. Sie können sich nur im Ruhezustand oder aktivierten Zustand befinden, im Übergang zwischen den beiden Zuständen (verbotener Zustand) kann das System nicht sein, es kippt immer in einen erlaubten Zustand. Dieser bedeutet einen Bereich oder ein Band, innerhalb dessen das System jeden Wert annehmen kann. Der erlaubte Zustand kann stabil oder instabil sein. Die üblichen Bezeichnungen, Formelzeichen für den Ruhezustand bzw. aktivierten Zustand sind:

aktivierter Zustand	aktiv	angeregt	ein	ON	high (H)	B	1
Ruhezustand	passiv	Grundzustand	aus	OFF	low (L)	A	0

Die obigen Zustände kann jeder beliebige physikalische Parameter einnehmen (z.B. elektrisches Spannungsniveau), es existieren aber auch biologische, physiologische Zustände (z. B. passiver und aktiver Zustand der Nervenzelle, Lidschlag usw.). Der **Übergang** zwischen den beiden Zuständen kann durch ein überschwelliges **aktivierendes Signal**, einen Impuls oder z.B. seine fallende Flanke ausgelöst werden. Das ist der sog. **Triggerimpuls**, der seinen Namen vom Gewehrabzug erhielt (Abb. 1).

IMPULSGENERATOREN

Man unterscheidet monostabile, astabile und bistabile Multivibratoren. Ihre Bezeichnung entspricht ihrer Funktion mit 1, 0 bzw. 2 stabilen Zuständen.

MONOSTABILER MULTIVIBRATOR (Z. B. DEFIBRILLATOR)

Ein **aktivierender (auslösender) Impuls (Trigger)** generiert einen einzigen **Impuls von bestimmter Dauer** (in der Regel einen Rechteckimpuls, Abb. 2). Die ansteigende Flanke des Rechteckimpulses löst der Triggerimpuls aus, die Rückkehr in den Grundzustand (fallende Flanke) erfolgt jedoch nach Ablauf einer sog. Zeitkonstante (τ) ohne Trigger von selbst. Das System bleibt dann im Ruhezustand, bis es ein neuer Triggerimpuls erreicht.

Beispiele:

- Bei jedem Ziehen am Abzug schießt die Pistole eine Kugel ab (one shot)
- Melodieklingel: Beim Drücken des Klingelknopfes (Trigger) kommt die Klingel in den aktiven Zustand (Abspielen eines Liedes)
- Die Nervenzelle antwortet auf ein überschwelliges Transmembranpotenzial (Trigger) mit einem kurzen Aktionspotenzial
- **Defibrillator**: Die auf den Brustkorb platzierten Elektroden leiten beim Drücken des Startknopfes (Trigger) die elektrische Ladung des aufgeladenen Kondensators zum Herzen

Am Beispiel des Defibrillators untersuchen wir die Möglichkeit der elektronischen Zeitschaltung (d. h. Einstellung der Impulsdauer τ) (Abb. 3). Der Brustkorb zwischen den Elektroden vertritt den Widerstand R , durch den wir den auf die Spannung U_0 aufgeladenen Kondensator mit der Kapazität C entladen. Am Widerstand R fließt ein exponentiell abnehmender Strom I , der hier eine ähnliche Spannung U generiert. Die **Zeitkonstante** τ ist davon bestimmt, in welcher Zeit die Spannung auf den Wert U_0/e sinkt. Die „Breite“ des exponentiell fallenden

Lehrbuch:
Damjanovich-Fidy-Szöllösi:
VII / 1. 7., IX / 4.

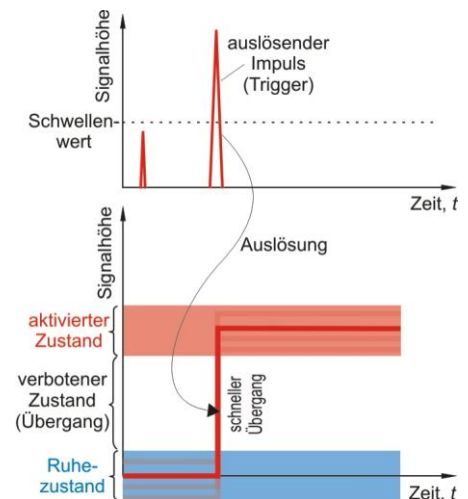


Abb. 1. Charakteristische Zustände eines Systems mit zwei Zuständen und Auslösung des Übergangs mit einem überschwelligen Trigger

monostabiler Multivibrator, Monoflop
one-shot, monoflop
monostabil multivibrátor

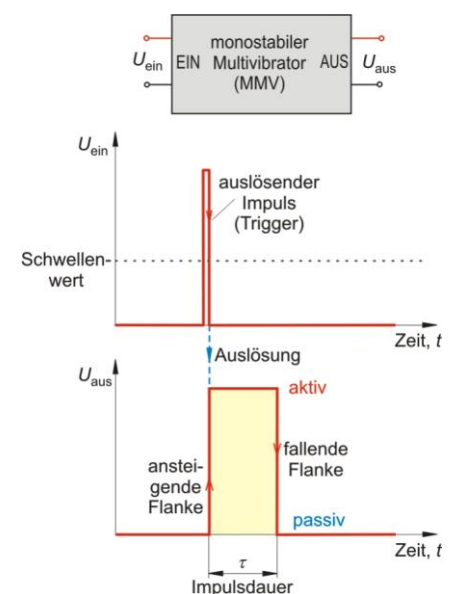


Abb. 2. Der monostabile Multivibrator kommt durch einen Trigger für eine bestimmte Zeitdauer in den aktiven Zustand

Impulses, die Impulsdauer, d.h. die Zeitkonstante hängt vom Widerstand und der Kapazität ab:

$$\tau = R \cdot C. \quad (1)$$

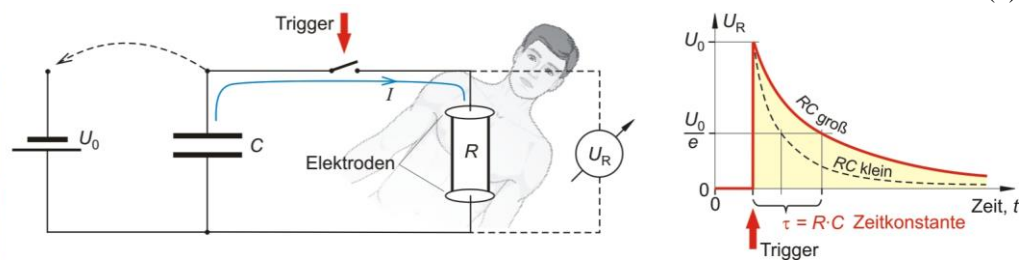
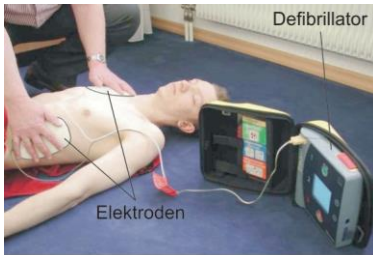


Abb. 3. Bild und Funktionsprinzip des Defibrillators. Die Zeitkonstante des Impulses kann mit den Elementen R und C beliebig eingestellt werden.

Im Praktikum 24. **HAUTIMPEDANZ** haben wir zwar gelernt, dass sich die Haut bzw. der menschliche Körper mit parallel geschalteten R und C Elementen modellieren lässt. Im Falle des Defibrillators dominiert aber der ohmsche Widerstand R , weil sich die Spannung relativ langsam ändert. In Abb. 3 ist nur noch das dargestellt.

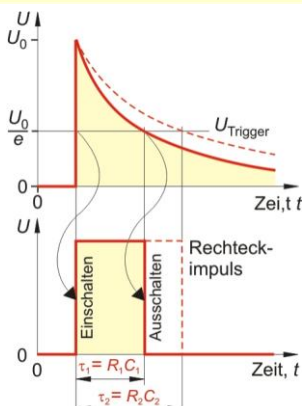


Abb. 4. Erzeugung von Rechteckimpulsen

- astabiler Multivibrator, Rechteckgenerator**
- free running multivibrator, relaxation oscillator**
- astabil multivibrátor**

Ein implantierbarer Pacemaker erzeugt Rechteckimpulse mit der Amplitude $U = 5\text{ V}$ und der Impulsdauer $\tau = 2\text{ ms}$. Der Widerstand der Gewebe zwischen den Elektroden ist $R = 2\text{ k}\Omega$. Der geplante mittlere Herzrhythmus ist $f = 70/\text{min}$. Die Impulse verbrauchen 25 % der gesamten verbrauchten Energie. Wieviel Amperestunden (Ah) soll eine Lithiumbatterie mit der Spannung $5,6\text{ V}$ haben, damit der Pacemaker 10 Jahre lang funktioniert?

Die Energie eines Impulses ist:

$$E_P = \frac{U^2}{R} \tau = \frac{(5\text{ V})^2}{2\text{ k}\Omega} 2\text{ ms} = 25\text{ }\mu\text{J}.$$

Die Zahl der Impulse in 10 Jahren ist:
 $N = 70/\text{min} \cdot 60\text{ min/h} \cdot 24\text{ h/d} \cdot 365\text{ d/Jahr} \cdot 10\text{ Jahre} = 3,68 \cdot 10^8$ Impulse.

Ihre Gesamtenergie ist:

$$E_i = N \cdot E_P = 3,68 \cdot 10^8 \cdot 25\text{ }\mu\text{J} = 9,2\text{ kJ}.$$

Die Batterie soll viertel soviel Energie liefern:

$$E_B = 4 \cdot E_i = 4 \cdot 9,2\text{ kJ} = 36,8\text{ kJ}.$$

Aus der $5,6\text{ V}$ Batterie soll die Ladung Q gewonnen werden:

$$Q = \frac{W}{U} = \frac{36,8\text{ kJ}}{5,6\text{ V}} = 6571\text{ As}.$$

So ist die „Kapazität“ der Batterie in Ah:

$$\frac{6571\text{ As}}{3600\text{ s/h}} = 1,82\text{ Ah} \approx 2000\text{ mAh}$$

Die Elektronik der Zeitschaltung von monostabilen Multivibratoren wird meist mit RC-Kreisen, ähnlich wie in Abb. 3 realisiert. Die exponentiell verlaufende Kurve kann auch mit einem Schalter geregelt werden (Abb. 4), der z.B. über einem gewissen Spannungsniveau (U_{Trigger}) eine konstante Spannung (U_1) einschaltet und sie unter dem Niveau ausschaltet. So erhält man einen Rechteckimpuls mit eingestellter Breite (reguliert durch die R und C Elemente).

ASTABILER MULTIVIBRATOR (Z.B. PACEMAKER)

Durch Kreisschaltung von zwei monostabilen Multivibratoren (MMV) erhält man einen sog. **astabilen Multivibrator** (AMV) (Abb. 5). Das Ausgangssignal des einen MMV (s. Abb. 2, fallende Flanke) startet nämlich als Trigger den zweiten MMV, der dann wieder den ersten MMV startet und so wiederholt sich der Prozess immer wieder. Es ist leicht einzusehen, dass man so einen periodischen Rechteckgenerator erhält. Jeder der beiden gekoppelten Ein- und Ausgänge kann als AMV-Ausgang benutzt werden.

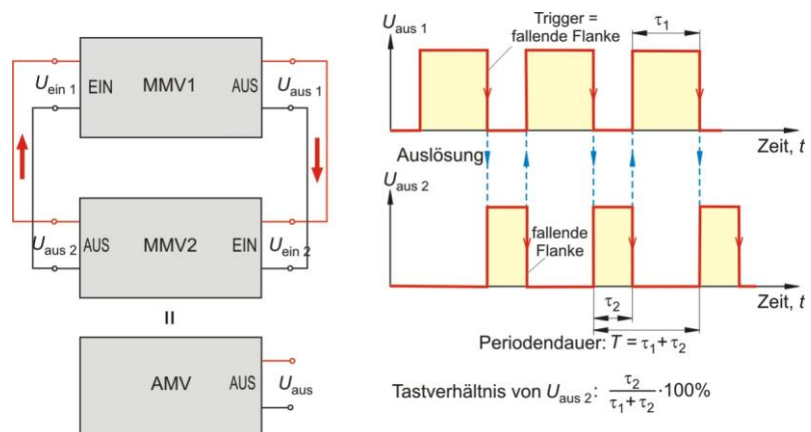


Abb. 5. Aufbau eines astabilen Multivibrators aus zwei monostabilen Multivibratoren

Die Periodendauer ist die Summe der Impulsdauer von beiden MMV:

$$T_{\text{AMV}} = \tau_1 + \tau_2. \quad (2)$$

Die Impulsbreiten der einzelnen MMV lassen sich natürlich mit den RC-Elementen unabhängig voneinander einstellen. So können Serien von Rechteckimpulsen mit beliebigem **Tastverhältnis** („duty-cycle“) erzeugt werden. Das Tastverhältnis zeigt an, den wievielten Teil (Prozent) der gesamten Periodendauer der Impuls, d. h. der aktivierte Zustand ausmacht. So beträgt es z. B. für die Signallerie U_{aus2} in Abb. 5:

$$\text{Tastverhältnis} = \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Das gesunde Herz enthält mehrere, einem AMV entsprechende anatomische Strukturen, Erregungszentren (Sinusknoten, Atrioventrikularknoten (AV-Knoten)), und auch die Kamtermuskulatur selbst enthält Schrittmacherzellen. So übernimmt z. B. beim pathologischen Ausfall des Sinusknotens der AV-Knoten die Reizbildung, wenn auch in langsamerem Takt. Wenn auch dieser oder die

Reizleitung nicht funktioniert, dann steuern die Schrittmacherzellen der Kammer die Kontraktionen mit noch langsamerer Herzschlagfolge (Bradykardie). In diesem Fall kommt ein künstlicher Herzschrittmacher, **Pacemaker** zum Einsatz, um den normalen Herzrhythmus wiederherzustellen.

Der Pacemaker ist ein AMV, dessen Ruhezustand ca. 0,8 - 1 s (τ_1) und dessen aktiver Zustand 0,05 - 2 ms (τ_2) dauert. Die Ausgangsspannung des aktiven Zustands (U_{aus} , die steuert die Herzmuskelkontraktionen) kann zwischen 0,8 V und 5 V eingestellt werden. Der Pacemaker mit Langzeitbatterie oder von außen induktiv aufladbarer Batterie wird in der Regel subkutan implantiert. Die Spezialelektroden werden über eine Vene in die Herzkammer eingeführt, wo sie entsprechend platziert verankert werden (s. Titelblatt oben).

Eigentlich erfüllt der Pacemaker selbst die Funktion eines künstlichen Triggers zum Auslösen der Kontraktionen in der entsprechenden Schlagfolge bei einem zu langsam oder unregelmäßig arbeitenden „biologischen astabilen Multivibrator“ (nämlich dem Herzen). Moderne Pacemaker setzen diese Funktion nur dann ein, wenn die eigenen Erregungszentren nicht normal funktionieren (Demand-Betriebsart).

Um die Funktion von antibradykarden Schrittmachern zu beschreiben, wurde ein internationaler fünfstelliger Buchstabencode entwickelt (Tabelle 1).

I.	II.	III.	IV.	V.
Stimulationsort	Ort der Signalwahrnehmung	Reaktion	Frequenz-adaptierung	Multifokale Stimulation
0 = Keine	0 = Keine	0 = Keine	0 = Keine	0 = Keine
A = Atrium	A = Atrium	I = Inhibierung	R = Frequenz-adaptierung vorhanden	A = Atrium
V = Ventrikel	V = Ventrikel	T = Triggerung		V = Ventrikel
D = Dual (A+V)	D = Dual (A+V)	D = Dual (I+T)		D = Dual (A+V)

Tabelle 1. Die gültige Buchstabencodierung von Schrittmachern und ihre Bedeutungen (2019).

Auf der Schrittmachergehäuse sind die erreichbare Funktionen immer dargestellt mit Hilfe von den Buchstabencodierung. Auf dem Beispielgerät (Abb 6) ist VVIR/AAIR bemerkbar, also wir können aus zwei möglichen Funktionen wählen.

- I. Die erste Position beschreibt den **Ort der Stimulation**. Hier sind A = Atrium, V = Ventrikel oder D = Dual (A + V) möglich. In unserem Beispiel steht hier V/A, also im Vorhof oder im Kammer ist eine Stimulation möglich.
- II. Die zweite Position bezeichnet den **Ort der Detektion**. Hier sind wieder A = Atrium, V = Ventrikel oder D = Dual (A + V) möglich. In unserem Beispiel steht hier V/A, also im Vorhof oder im Kammer ist eine Detektion auch möglich.
- III. Die dritte Position beschreibt die **Reaktion**. Der Schrittmacher wird durch die Detektion eines Signals inhibiert – gibt keine Impulse ab (I = Inhibierung) – oder dies die Abgabe des folgenden Impulses triggert (T = Triggerung). Die Triggerung in der atrioventrikulären Leitungsströmung (AV - Blockierung) eine wichtige Bedeutung hat. In unserem Beispiel steht I/I, also nur Inhibierung möglich ist.
- IV. Die vierte Position gibt an, ob der Schrittmacher unabhängig von der Sinusknotenfrequenz die Schrittmachfrequenz erhöhen kann – das ist die **Frequenzadaptierung**. Die frequenzadaptive Schrittmacher (R = Frequenzadaptierung) verfügen zusätzlich über einen Sensor, mit dem der Schrittmacher die Veränderungen der Körperaktivität detektiert und die Leistungsfähigkeit der Patienten verbessert. Im Beispiel ist es R/R, also in beiden Einstellungen erreichbar.

Auf älteren Geräten als IV. Position Markierung „C“ war noch ausfindig, die die äußere Kommunikation bedeutet. Bei Schrittmachern heutzutage äußere Kommunikation ist eine Grundfunktion, deswegen ist es nicht mehr vermerkt.



Abb. 6. Buchstabencode vom Schrittmacher

Die mögliche geeignete Sonden sind neben der Buchstabencodierung auch dargestellt (z.B. unipolar/bipolar). Bei unipolaren Sonden erfolgt die Stimulation bzw. Detektion zwischen Elektroden Spitze und Schrittmachergehäuse. Bei bipolaren Sonden erfolgt dies zwischen Elektroden Spitze und einer weiteren Elektrode wenige Zentimeter proximal der Elektroden Spitze.

- V. Die fünfte Position beschreibt die Möglichkeit von **multifokaler Stimulation** (biatrial und/oder biventrikulär). Im Beispiel sehen wir keine fünfte Buchstabe. Das heißt, daß in unserem Schrittmacher diese Funktion nicht erlaubt ist.

BISTABILER MULTIVIBRATOR (Z. B. SPEICHERELEMENT)

Durch einen aktivierenden Impuls (Trigger) **ändert sich der Zustand des bistabilen Multivibrators** (Abb. 7). Befand er sich im Zustand A, so kippt er in Zustand B, war er im Zustand B, so kippt er in Zustand A, und in diesem Zustand verharrt er bis zum nächsten Trigger. Hier kann man also von zwei gleichwertigen, stabilen Zuständen sprechen, daher kommt auch die Bezeichnung bistabil.

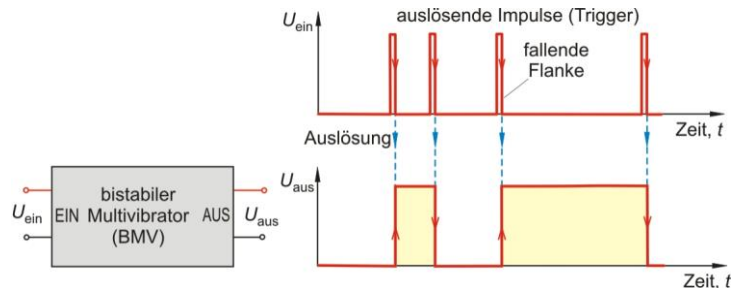


Abb. 7. Der Zustand eines bistabilen Multivibrators ändert sich nach einem Trigger

Beispiele, Bemerkungen:

- Schalter: Das Umschalten (Trigger) ändert den Zustand des geschalteten Geräts (aus, ein, aus, ein usw.)
- Speicher: Eintragen oder Löschen (Trigger) ändert den Inhalt des Speicherelements ($0 \rightarrow 1$ oder $1 \rightarrow 0$) und da dieser Zustand bleibt, kann man von einem Speichern sprechen. Der Speicher digitaler Computer besteht aus BMV.
- Man betrachte Abb. 6: Die Zahl der Ausgangsimpulse ist stets die Hälfte der Zahl der Eingangsimpulse, deshalb kann der BMV auch als Frequenzteiler benutzt werden.
- Mit der Reihenschaltung mehrerer BMV kann eine binäre Zählerkette gebildet werden (s. Titelblatt unten). In den arithmetischen Einheiten digitaler Computer sind auch BMV zu finden.

ABLAUF DER MESSUNG

DEMONSTRATION

1. Demonstration von Pacemakerimpulsen am Oszilloskop
2. Demonstration von Impulsformen des Reizstromgenerators MINISTIM am Oszilloskop

AUFGABEN:

In der Messanordnung (Abb. 8) für die Praktikumsaufgaben befinden sich zwei gleiche monostabile Multivibratoren (MMV). In ihren RC-Kreisen kann der Widerstand R mit einem Drehschalter stufenlos zwischen 1 und 10 k Ω reguliert werden. Von den Kondensatoren können zwei Kapazitäten ($C_1 \cong 100 \mu\text{F}$, $C_2 \cong 1 \mu\text{F}$) in den Kreis geschaltet werden. Das Aktivieren (Trigger) erfolgt vom Ausgang des anderen MMV oder über den Startschalter. In der Modellanordnung befindet sich auch eine Zählerkette aus 4 bistabilen Multivibratoren (BMV).

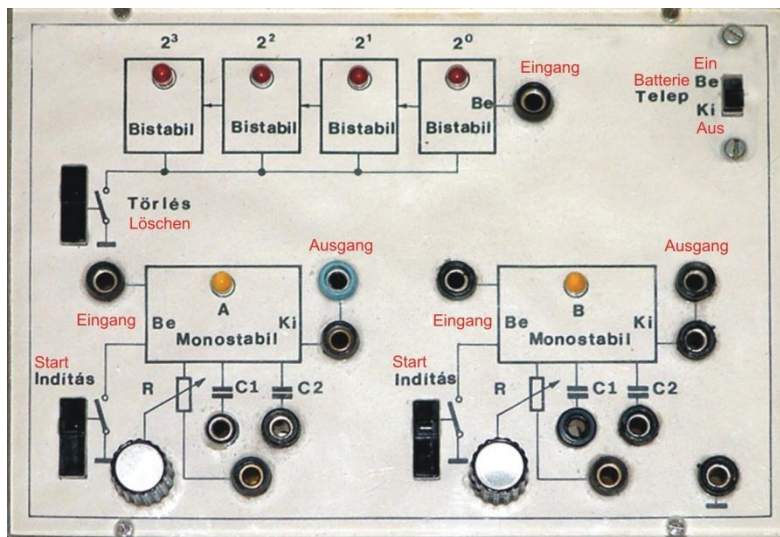


Abb. 8. Mit verschiedenen Zusammenstellungen des Messmodells können die Funktionen des monostabilen, astabilen und bistabilen Multivibrators studiert werden

MONOSTABILER MULTIVIBRATOR

1. Es wird der Kondensator C_1 mit der höheren Kapazität gewählt und mit dem freien Auge die Impulsdauer des aktivierten Zustands (LED leuchtet) bei verschiedenen Widerstandswerten R beobachtet.
2. Die 1. Aufgabe wird so wiederholt, dass am Oszilloskop mit DC-Eingang (empfohlene Einstellung: **X**: 1 ms/DIV und **Y**: 1 V/DIV) die Spannungen im Grundzustand und im aktivierten Zustand beobachtet werden und die Differenz (Amplitude des Rechteckimpulses) gemessen wird.
3. Der Ausgang des MMV wird an die bistabile Teilerkette angeschlossen und das Zählen einiger Impulse im binären Zahlensystem verfolgt. Die Summe der Werte über den gerade leuchtenden LEDs ergibt die Impulszahl.
4. Bei beiden MMV wird der Kondensator mit der höheren Kapazität (C_1) an den RC-Kreis angeschlossen. Der Ausgang des einen MMV (**A**) wird an den Eingang des anderen MMV (**B**) angeschlossen. Aufgabe 1 wird so wiederholt, dass der MMV (**A**) gestartet wird.

ASTABILER MULTIVIBRATOR UND BISTABILE MULTIVIBRATORKETTE

5. Durch Verbinden beider Ausgänge mit dem Eingang des jeweils anderen MMV erhält man einen AMV (Abb. 9). Im RC-Kreis beider MMV wird der Kondensator mit der höheren Kapazität (C_1) benutzt. Während des Veränderns der Widerstandswerte werden die Änderungen der Lämpchen **mit freiem Auge beobachtet**. Unter Nutzung der Zählerkette verfolge man das Zählen der Glieder der langsamen Impulsserie.

MESSUNG UND SIMULIEREN VON PACEMAKERIMPULSEN

6. Es wird die Dauer des aktivierten Zustandes und Ruhezustandes von den Impulsen des gegebenen Schrittmachers mit Hilfe vom digitalen Oszilloskop gemessen. Es sollen die Periodenzeit, die Frequenz und Tastverhältnis berechnet werden. Mit Hilfe der Buchstabencodierung von Schrittmachern (Tabelle 1) wird die Funktion des Schrittmachers bestimmt.
7. Mit dem Messmodell wird eine Schaltung hergestellt, bei welcher das Tastverhältnis der Impulsserie dem Tastverhältnis der Pacemakerimpulsserie am nächsten kommt. Mit dem digitalen Oszilloskop wird die Dauer des aktivierten Zustandes und Ruhezustandes von den Impulsen gemessen. Es sollen die Periodenzeit, die Frequenz und Tastverhältnis berechnet werden und die Parametern werden mit dem echten Schrittmacher verglichen. Es sollen die Energie eines Impulses und die während eines Impulses durchgeflossene Ladung berechnet werden, unter der Annahme, dass der Impuls auf Körpergewebe mit dem Widerstand $R = 2000 \Omega$ geschaltet wird.

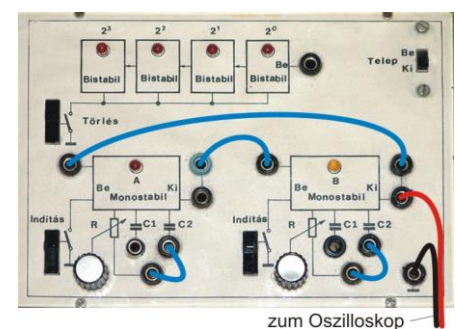


Abb. 9. Schaltplan des astabilen Multivibrators