

Codierungssystem für Herzschrittmacher

Ein didaktisches Modell / Von Werner Irnich

Als 1958 zum ersten Mal ein Schrittmacher bei einem Patienten implantiert wurde, konnte noch niemand ahnen, welch ungeheure Entwicklung diesem „Therapeutikum“ einmal beschieden wäre. Weltweit werden etwa jährlich 300 000 Schrittmacher benötigt, in der Bundesrepublik Deutschland waren es 1985 allein 35 500. Wir schätzen, daß Ende des Jahres 1985 142 000 Patienten mit einem Schrittmacher ihr Leben lebten. Dabei ist noch nicht einmal die zahlenmäßige Entwicklung das Entscheidende, vielmehr haben sich im Lauf der Jahre Erfahrungen herausgebildet, die die Einpflanzung von Schrittmachern in den verschiedensten Ausführungen zu einer für den Patienten gefahrlosen Operation werden ließen. Bei kaum einem anderen Therapieverfahren kann der Patient zwischen dem beschwerlichen und mühsamen Zustand vor und dem Zustand der Befreiung nach Operation so deutlich unterscheiden. Wenn weltweit mehr als 1 Million Patienten bisher den Segen dieses elektronischen Gerätes erfahren haben, so ist es sicher nicht übertrieben, den Schrittmacher als einen Meilenstein in der modernen Medizin zu bezeichnen.

Die heutigen technologischen Möglichkeiten, vor allem die der modernen Elektronik haben dazu geführt, daß verschiedene Schrittmacherversionen entwickelt wurden, um so besser auf die individuellen Herzfehler eingehen zu können. Diese Vielfalt an Möglichkeiten hat zwar die Therapieform bereichert, sie bringt allerdings die Problematik mit sich, daß es immer schwieriger wird, das Besondere einer Version in Worten zu beschreiben. Aus diesem Grunde hat man sich Mitte des vergangenen Jahrzehnts in Amerika Gedanken darüber gemacht, wie man durch eine kurze, prägnante Codierung die einzelnen Schrittmacherversionen kenntlich machen könnte, um so die Beschreibung auf dem Schrittmacher selbst, auf seiner Verpackung sowie im Patientenausweis platzsparend vornehmen zu können. Man muß heute bedauernd feststellen, daß das vor gut zehn Jahren ausgedachte Codierprinzip durch die technologische Entwicklung überholt wurde und somit nicht ausreichend die darin gesetzten Erwartungen erfüllen konnte.

Einen Schrittmacher zu beschreiben, erfordert – gleich, ob es in Worten oder mit einem Codiersystem geschieht – das Verständnis des Zusammenwirkens zwischen Schrittmacher und Herz. Zu erkennen, was sich hinter einem Codewort verbirgt, setzt immer die Umsetzung von Andeutungen in Funktionsabläufe voraus. Je karger ein Code ausgerüstet ist, um so schwerer wird vor allem sein Verständnis bei den Menschen sein, die nicht täglich gewöhnt sind, mit diesem Code zu leben. Hier dürfte ein bildhafter Code noch am ehesten in der Lage sein, eine Brücke zwischen Funktion und Code herzustellen.

Indikation zur Schrittmacherimplantation

Das gesunde Herz wird über elektrische Signale in seiner Funktion gesteuert. Dieses Steuersignal entsteht in der rechten Vorhofkammer und breitet sich von dort über beide Vorhöfe aus. Die Herzfrequenz, damit die Pumpfrequenz und auch das, was wir

Pulsfrequenz nennen, wird durch dieses Signal gesteuert. Das gleiche Signal erreicht den „Atrioventricular-Knoten“, üblicherweise abgekürzt „AV-Knoten“, wird verzögert und erregt durch die beiden Hauptkammern und leitet so die Kontraktion, damit die Pumpfähigkeit des Herzens ein. Diese, für die mechanische Arbeit des Herzens sinnvolle Abfolge, kann an jeder Stelle innerhalb des Herzens dauernd oder intermittierend gestört werden, wobei im allgemeinen Durchblutungsmangel hierfür die Ursache ist. Der häufigste Fehler wirkt in der Weise, daß die Synchronisation zwischen den Vorhöfen und den Hauptkammern unterbrochen wird. Daneben gibt es aber auch den Defekt, daß das elektrische Erregungssignal nicht von seinem Ursprungsort auf die umgebende Muskulatur des Vorhofs überspringen kann.

Schließlich ist beim „Syndrom des kranken Sinusknotens“ die Funktion der Signalerzeugung beeinträchtigt. Wenn aus den aufgezählten Defekten eine Beeinträchtigung für den Patienten resultiert, pflegt man heute einen Schrittmacher zu implantieren.

Der Schrittmacher macht sich die Tatsache zunutze, daß Muskeln oder Nerven durch einen elektrischen Impuls erregt werden können. Dabei bietet das Herz den Vorteil gegenüber jedem anderen Muskel, daß eine an einer Stelle eingeleitete Erregung sich über den gesamten Muskel fortpflanzt. In dieser physiologischen Eigenschaft des Herzens liegt der Erfolg der Herzschrittmacherverapie begründet, da man mit einem örtlich begrenzten Impuls geringer Intensität die Schlagfolge des Herzens in gewünschtem Sinne beeinflussen kann.

Verschiedene Schrittmacherversionen

Der erste, im Jahre 1958 implantierte Schrittmacher bestand aus einem sehr einfachen Gerät, das unbeeinflusst von spontaner Aktivität des Herzens regelmäßig seine Impulse an das Herz abgab. Diese Art der Betriebsweise nennt man „asynchron“ oder aber auch „festfrequent“. Schon bald erkannte man, daß die fehlende Reaktion auf Eigenschläge des Herzens ungünstig war und beim Patienten Herzklopfen und Beklemmung hervorrief. Die Lösung dieses Problems wurde durch die Einführung einer Schrittmacherversion gefunden, die die Herzeigentätigkeit überwachte und nur dann elektrische Impulse abgab, wenn diese eine vorgegebene Frequenz unterschreiten sollte. Der Schrittmacher, der also nur „auf Verlangen“ – im Englischen heißt dies „on demand“ – handelt, wird als Schrittmacher vom Inhibitionstyp oder auch „Demand-Schrittmacher“ bezeichnet. Eine andere Version löste das gleiche Problem in der Weise, daß ein Stimulus bei vorhandener Herzeigentätigkeit synchron in das Herzsignal abgegeben wird, wenn die Eigenfrequenz die des Schrittmachers übersteigt. Diese Art der Synchronisation wird „getriggert“ genannt.

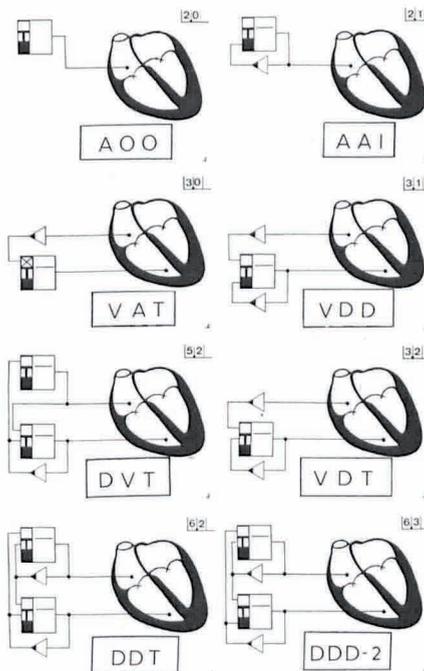


Bild 1: Zusammenstellung gebräuchlicher Schrittmacherversionen in einem bildhaften Code.

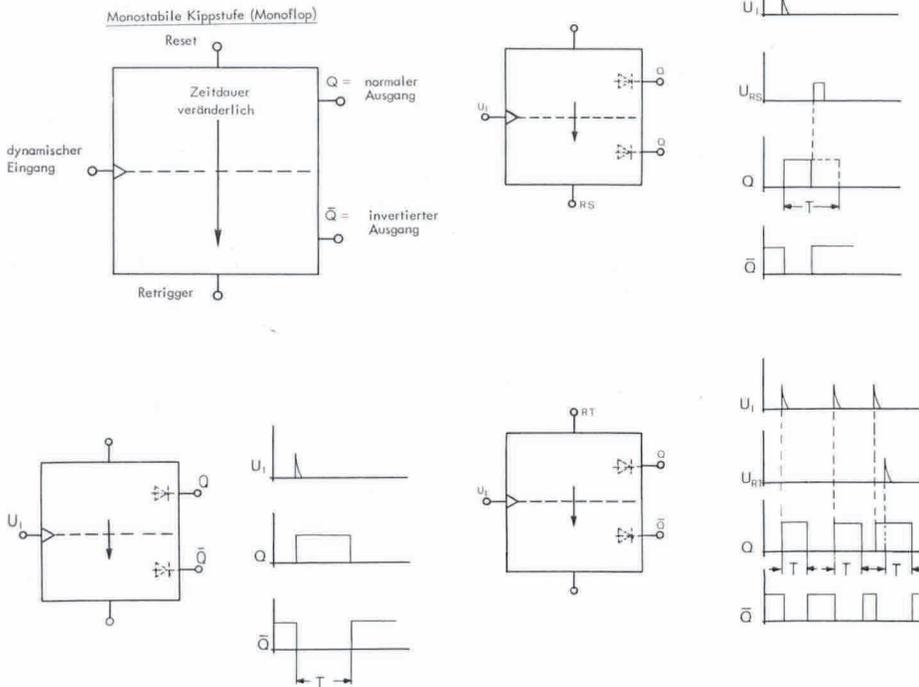


Bild 2a-d (von links nach rechts): Wirkungsweise der monostabilen Kippstufe: a) die verschiedenen Eingänge und Ausgänge bedeuten; dynamischer Eingang = nur eine Signaländerung triggert, Retrigger = RT = die Zeitdauer der Kippstufe beginnt von neuem, wenn sie bereits aktiviert war, Reset = RS = eine aktivierte Stufe wird wieder zurückgesetzt, Q = normaler Ausgang = Spannung = hoch, aktiviert, \bar{Q} = invertierter Ausgang = Spannung = niedrig, aktiviert, b) Aktivierung durch einen Spannungsimpuls U am dynamischen Eingang für die Zeitdauer T, c) Aktivierung durch 3 Spannungsimpulse U und Retriggerung durch eine Spannungsimpuls U_{RT} am Retriggereingang RT, d) Inaktivierung durch einen Spannungsimpuls U_{RS} einer bereits laufenden Kippzeit T.

Man kann nun neben der Stimulation der rechten Hauptkammer – in diese hinein kann man am einfachsten eine Elektrode legen –, auch den rechten Vorhof künstlich erregen oder aber, man stimuliert sogar beide Kammern mit der physiologisch sinnvollen Verzögerung nacheinander. Je nachdem, ob man eine asynchrone, eine getriggerte oder eine inhibierte Betriebsweise anwendet und diese kombiniert mit Vorhof oder Hauptkammer oder Vorhof und Hauptkammer, ergeben sich die verschiedensten Schrittmacherversionen, die man beim heutigen Stand der Technologie ohne operativen Eingriff zum Teil von außen programmieren kann.

Drei-Lettern-Code

Ein 1975 in Amerika vorgestellter Code, „Three-Letter-Code“ genannt, versucht durch Buchstaben, die Kombination von Stimulationsort und Synchronisationsweise zu verknüpfen. Entsprechend Tabelle 1 bedeutet die Position des ersten Buchstabens, welche Kammer stimuliert wird. Dabei bedeuten die Buchstaben V: Ventrikel

(Hauptkammer), A: Atrium (Vorhof), und D: „Dual“, also beide Herzkammern. Der zweite Buchstabe soll festlegen, in welcher Kammer die Herzzeitätigkeit überwacht wird. Die Bedeutung der Buchstaben ist auf der zweiten Stelle identisch mit denen an der ersten Stelle. Die dritte Position gibt nun an, wie der Schrittmacher auf ein wahrgenommenes Herzsignal reagiert. Dabei bedeutet I: Inhibition, also Einnehmen der Wartestellung, T: Triggern, also Abgabe eines Impulses in die spontane Herzerregung, D: beide Synchronisationsarten finden geeignet Anwendung. Zum D in der dritten Position muß man anmerken, daß diese Betriebsart nur sinnvoll ist, wenn im Vorhof und in der Hauptkammer die Herzzeitätigkeit überwacht wird. Dann kann nämlich ein Herzsignal im Vorhof dafür sorgen, daß zeitlich verzögert ein elektrischer Impuls an die Hauptkammer abgegeben, also getriggert wird, während ein Herzsignal in der Hauptkammer den Schrittmacher inhibiert. Die Schwäche des Drei-Lettern-Codes liegt in der Unbestimmtheit begründet, die durch das „D“ in der dritten Position gegeben ist.

Tabelle 1: Erklärung des „Drei-Lettern-Codes“

1. Buchstabe:	Kennzeichnung der stimulierten Kammer A = Atrium V = Ventrikel D = beide (von double) (S* = entweder A oder V)
2. Buchstabe:	Kennzeichnung der synchronisierenden Kammer A = Atrium B = Ventrikel D = beide O = nicht vorhanden (S* = entweder A oder V)
3. Buchstabe:	Kennzeichnung der Antwort auf ein synchronisierendes Signal I = Inhibition (Impulsunterdrückung) T = Triggerrung (Impulsantwort) D = sowohl I als auch T O = nicht vorhanden

* S wird vom Hersteller dann angegeben, wenn beide Kammern für die Anwendung in Frage kommen, wie dies bei programmierbarer Empfindlichkeit möglich ist

Grundsaltung eines Schrittmachers

Die zeitlichen Abläufe in einem Schrittmacher, gleichgültig wie kompliziert er sein mag, sind relativ einfach verständlich zu machen, wenn man eine elektronische Schaltung eingeführt und erklärt hat. Diese Basisschaltung wird durch eine sogenannte „monostabile Kippstufe“ (s. Bild 2) dargestellt, die verkürzt auch „Monoflop“ genannt wird. Seine Funktionsweise ist recht einfach: Auf ein elektrisches Signal am Eingang antwortet die Schaltung in der Weise, daß ihr Ausgang für eine bestimmte Zeit von Null auf eine hohe Spannung umschaltet, dort verbleibt und anschließend ihren ursprünglichen Zustand wieder annimmt (Bild 2b). Derartige Schaltungen, die man heute preiswert als integrierte Schaltkreise kaufen kann, besitzen darüber hinaus noch einen komplementären Ausgang, so daß dort bei Eintreffen eines Eingangssignals die Spannung von hoch auf Null umschaltet, während der Monoflop-Zeit dort verbleibt und anschließend wieder den ursprünglichen Zustand hoher Spannung annimmt (Bilder 2b-d). Mit einem derartigen Monoflop könnte man beispielsweise einen Impuls definierter Dauer erzeugen. Schaltet man zwei Monoflops in Reihe, wobei der komplementäre Ausgang des ersten Flops auf den Eingang des zweiten gelegt wird, so wird auf ein Eingangssignal am ersten Flop hin das zweite Flop einen Impuls abgeben und zwar dann, wenn die Zeit des ersten Monoflops abgelaufen ist. Die so geschilderte Reihenschaltung stellt ein Verzögerungsglied dar, das man beispielsweise dazu nutzen könnte, die Verzögerungszeit in einem Schrittmacher zwischen dem Vorhofsignal und der Stimulation der Hauptkammer zu simulieren. Wenn man nun

noch einen Verstärker einfügt, der Herzsignale so verstärkt, daß sie monostabile Multifibratoren beeinflussen können, kann man mit diesen beiden Basisschaltungen auch komplizierteste Systeme nachbilden. Allerdings muß dazu noch ein zweiter Eingang von Monoflops eingefügt werden, der üblicherweise mit RT bezeichnet wird, was für „Retriggerung“ steht (s. Bild 2c). Dabei wird das Monoflop gezwungen, noch einmal mit seiner Monoflop-Zeit zu beginnen. Mit dieser Möglichkeit kann das Verhalten der Inhibition realisiert werden.

Schließt man zwei Monoflops nicht nur in Serie, sondern verbindet auch den Ausgang des zweiten Flops wieder mit dem Eingang des ersten, entsteht eine Ringschaltung, die einmal angeschwungen zu einem Impulsgenerator wird. Dabei bestimmt das erste die Periodendauer τ , das zweite die Impulsdauer (s. Bild 3).

Realisierung verschiedener Schrittmacherversionen

Man kann nun sehr einfach zeigen, und dafür wurde das Modell auch gebaut, daß die Verknüpfung derartiger Monoflops in geeigneter Weise die verschiedensten Schrittmacherversionen simulieren kann. In Bild 3 sind in ein Kästchen hinein alle benötigten Zeitglieder eingetragen worden, die nur noch über durchnummerierte Brücken in geeigneter Weise miteinander verbunden werden müssen. Außerhalb des Kästchens liegt ein Verstärker mit einem nachgeschalteten Monoflop, das die „Refraktärzeit“ vorgeben soll. Hierdurch wird erzwungen, daß die verschiedenen Zacken eines Herzsignals nicht mehrfach synchronisierend in die Elektronik eingreifen können, da der Ausgang des R-Monoflops auf ein Signal hin für eine gewisse Zeit, sagen wir 300 ms, am Ausgang den Zustand hoher Spannung annimmt.

So ist beispielsweise der nicht zu beeinflussende asynchrone Schrittmacher, wie er in Bild 1a in seiner Wirkungsweise dargestellt wird, einfach durch Schließen der Brücke 8 in Bild 3 zu realisieren. Die Version vom Inhibitionstyp kann man sich so vorstellen: Ein Herzsignal gelangt über den Verstärker, das R-Monoflop, über die Brücke 1 und über eine Diode auf den RT-Eingang des Monoflops T, das für die Periodendauer des Schrittmachers verantwortlich ist. Der Retrigger-Vorgang läßt das T-Monoflop wieder von vorne starten, so daß sich dieses System dem Herzrhythmus unterordnet, ohne einen Impuls abzugeben. In gleicher Weise kann man sich überlegen, daß die ge-

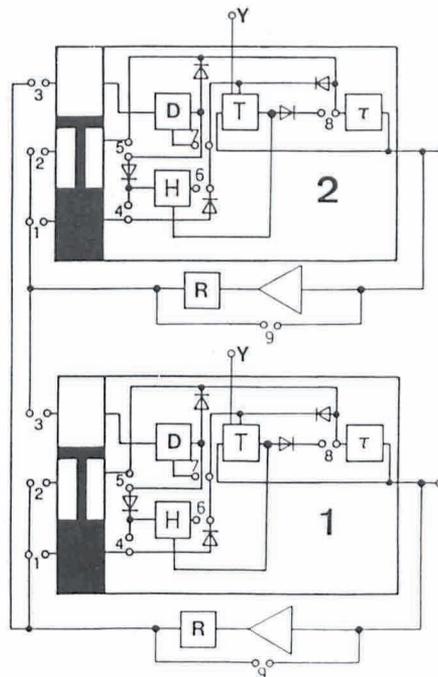


Bild 3: Schematische Darstellung der einzelnen Zeitfunktionen innerhalb eines Schrittmachers. Durch Schließen von Schaltern in geeigneter Weise können vom einfachsten Einkanal- bis zum kompliziertesten Zweikanal-Schrittmacher alle Systeme simuliert werden. Dabei bedeuten die einzelnen Blöcke: τ = Impulsdauer, T = Periodendauer, D = Verzögerungsdauer, H = Hysteresedauer (die Periodendauer T kann durch einen Verstärkerimpuls um H verlängert werden), R = Refraktärzeit (unempfindlich für weitere Signale).

triggerte Version dadurch zu realisieren ist, daß man anstatt der Brücke 1 die Brücke 2 in Bild 3 schließt.

Die gegenseitige Beeinflussung zwischen Vorhof und Hauptkammer erfordert noch einen dritten, mit 3 gekennzeichneten Eingang, bei dem ein Verzögerungsflop D die zeitliche Aufeinanderfolge zwischen beiden Kanälen miteinander verknüpft. Die Dioden in Bild 3 sollen nur dafür sorgen, daß Signale auf einen Eingang innerhalb des Schaltplanes in einer Richtung geführt werden. Sie sind im Sinne eines Einbahnstrassenschildes zu verstehen.

Bildhafte Codierung

Die Brücken 4, 5, 6 und 7 in Bild 3 werden benötigt, um speziellere Abwandlungen des Schrittmacherprinzips zu erreichen. Für das Verständnis einer bildhaften Codierung

sollten wir diese alle offen lassen und das mit „H“ gekennzeichnete Monoflop als nicht existent betrachten. Dann sieht man unmittelbar, daß über drei verschiedene Eingänge in Zusammenarbeit mit dem Verstärker die unterschiedlichen Reaktionsweisen eines oder zweier Schrittmacher-Kanäle erklärt werden kann. Dazu brauchen wir nur den unteren, mit 1 bezeichneten und durch ein schwarzes Feld gekennzeichneten Eingang als „Inhibitions-Eingang“, den mit 2 bezeichneten Eingang, charakterisiert durch ein T im Eingangsfeld für „Triggerung“ als „getriggerten Eingang“ und das obere, mit 3 gekennzeichnete Feld als „Eingang mit Verzögerung“ zu definieren, um Stimulationssysteme in ihrem Zusammenwirken mit dem Herzen zu charakterisieren. In Bild 1 wird eine Zusammenstellung derartiger charakteristischer Codierbilder wiedergegeben, wobei die Buchstabenfolge das Verhalten im Drei-Lettern-Code bezeichnet. Der bildhafte Code wird in seinem Verständnis dadurch gesteigert, daß man die Verbindungslinien zum Herzen hin erkennt, wo Stimulation und wo die Überwachungstätigkeit im Herzen stattfindet. Letzteres wird einfach durch das dreieckige Verstärkersymbol angedeutet.

Geringe Kenntnisse ausreichend

Die bildhafte Codierung erfordert nur geringe Kenntnisse, wie die Reaktion der drei unterschiedlichen Eingänge ist und ob Überwachung der Herzstätigkeit gegeben ist oder nicht. Mit diesen vier Spielregeln lassen sich formal alle Schrittmacherversionen darstellen, wobei jedoch als Vorteil gegenüber dem Drei-Lettern-Code festzuhalten ist, daß die Verknüpfung eindeutig und, da in der Art eines Blockdiagramms dargeboten, für den weniger Bewanderten einfach nachzuvollziehen ist. Zu demonstrieren, wie bei vorgegebenen Herzrhythmus-Anomalien die verschiedenen Versionen reagieren, dazu wurde das Modell mit zehnfacher Zeitdehnung geschaffen. Damit wird es möglich, das Codierschema zu einem System mit Informationsabläufen auszubauen, um so die Verknüpfungen nachvollziehen zu können. Wer eine im Drei-Lettern-Code vorgegebene Version mit Hilfe des Modells realisieren und damit auch bildhaft beschreiben kann oder wer den umgekehrten Weg von der bildhaften Darstellung zum Beschreiben im Drei-Lettern-Code beschreiten kann, der kann sich zugute halten, daß er ausreichend tief in die Geheimnisse der Schrittmachertechnologie eingedrungen ist.