

## Herzschlag ist der Takt

*Manchmal darf unser Herz etwas aus dem Takt geraten und z. B. etwas schneller schlagen, wenn wir verliebt sind, oder vor Schreck „stehen bleiben“. Gerät das Herz jedoch gesundheitsgefährdend aus dem Tritt, hilft der Herzschrittmacher.*



**Abb. 1:** Frühe Herzschrittmacher: oben ein Modell, das noch äußerlich getragen werden musste, rechts der erste implantierbare Herzschrittmacher von 1958. (Quellen: Medtronic; Siemens)



Schlägt das Herz zu langsam (sog. Bradykardie), kann das erhebliche Auswirkungen für die Betroffenen haben. Der Körper wird schlechter mit Blut und Sauerstoff versorgt, worauf vor allem das Gehirn empfindlich reagiert – Schwindel sind die Folge, längerfristig kann dies auch lebensbedrohlich sein.

Je nach Befund kann eine Herzrhythmusstörung die Implantation eines Herzschrittmachers notwendig machen, der – in der Anfangszeit als reiner Taktgeber, heutzutage von außen programmierbar – seit über vier Jahrzehnten fester Bestandteil der Therapie von zu langsam schlagenden Herzen ist.<sup>1)</sup>

### Elektrische Impulse

Das Herz ist aufgebaut aus einem rechten und linken Vorhof (Atrium) sowie einer rechten und linken Kammer (Ventrikel). Rechte und linke Seite sind durch die Herzscheidewand getrennt. Jeder Herzschlag pumpt das Blut zunächst von den Vorhöfen in die Kammern, von dort wird es anschließend linksherum in den Körper und rechtsherum in die Lunge gepresst. Etwa 70-mal pro Minute findet dieser Vorgang beim ruhenden Menschen statt<sup>2)</sup>, d. h. über 100000-mal am Tag, gesteuert vom Sinusknoten im rechten Vorhof, dem „natürlichen“ Schrittmacher. Er gibt regelmäßig schwache elektrische Impulse ab, die über den sog. AV-Knoten an Leitungsfasern der Herzkammern weitergeleitet werden und deren Kontraktion auslösen.

Ist dieses elektrische Leitsystem gestört oder blockiert, muss der Herzschrittmacher die Aufgabe

übernehmen, mit elektrischen Impulsen den Herzmuskel zur Arbeit anzuregen. Wieviele Elektroden zur Anregung gebraucht werden, hängt davon ab, welche Komponente des natürlichen Herzschlags nicht mehr einwandfrei funktioniert. Es gibt sowohl *unifokale* Schrittmacher mit nur einer Elektrode (entweder zur Hauptkammer oder zum Vorhof) als auch *bifokale* Zweikammerschrittmacher. Die Impulse haben eine Spannung von ein bis zwei Volt und dauern einige Millisekunden. Ein Herzschrittmacher gibt nicht nur blind einen festgelegten Takt vor, sondern versucht, seine Tätigkeit anhand der natürlichen Schläge zu synchronisieren.

Die meisten modernen Herzschrittmacher sind von außen programmierbar, so dass sie genau auf die Bedürfnisse und die Veränderungen beim Patienten eingestellt werden können. Sie haben also drei Aufgaben zu leisten: die Detektion der vorhandenen elektrischen Herzaktivität, die Stimulation des Herzens sowie die Steuerung, welche die physiologischen Bedürfnisse berücksichtigt (Abb. 2). Zur Detektion und zur Stimulation dienen die Elektroden, die Auswertung und Steuerung übernimmt ein Mikroprozessor im Herzschrittmachergehäuse. Falls der Sinusknoten und die Vorhöfe noch funktionieren und nur die natürliche Verbindung zu den Kammern gestört ist (AV-Block), regt der Herzschrittmacher auch nur die Kammern an.

### Unerwünschtes Herzklopfen

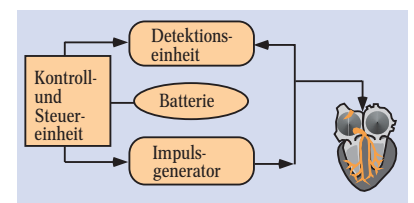
Arbeitet der Sinusknoten hingegen nicht mehr selbstständig, muss der Schrittmacher auch die Anpassung der Herzaktivität an die körperliche Belastung übernehmen. Dazu braucht er zusätzliche Sensoren, die ihm Informationen über Muskelaktivität und Atmung verschaffen. Eine erhöhte Muskelaktivität, beispielsweise beim Sport, erzeugt im Körper mechanische Schwingungen, die mithilfe eines Piezokristalls, der sie in belastungsproportionale elektrische Schwingungen umwandelt, wahrgenommen werden können. Ein solcher Aktivitätssensor erfasst zwar verzögerungsfrei Anfang und Ende einer körperlichen Belastung, reagiert aber auf bestimmte Belastungsformen (z. B. Fahrradergometer) ungenügend und löst auch schon mal Fehlalarme aus, wenn der Körper erschüttert, aber nicht belastet

wird, etwa beim Reiten. Diese mangelnde Spezifität kann unangenehmes Herzklopfen hervorrufen.

Im Unterschied dazu nutzt der sog. Atemminutenvolumen-(AMV)-Sensor aus, dass das Atemvolumen vom tatsächlichen Sauerstoffbedarf des Körpers abhängt und damit auch vom Aktivitätszustand. AMV-Sensoren schätzen das Atemminutenvolumen indirekt ab, indem sie den zeitlichen Verlauf der elektrischen Impedanz zwischen dem Schrittmachergehäuse und der Elektroden Spitze messen; das Produkt aus Frequenz und Amplitude der Impedanzschwankung ist mit dem AMV korreliert. Kombiniert man beide Sensortypen, hat man ein System, das sowohl schnell als auch spezifisch reagiert.

### Eine kritische Verbindung

Die Elektrode verbindet Schrittmacher und Herz. Zwei Typen werden unterschieden: Bei der unipolaren Elektrode dient die Elektroden Spitze als Kathode und das Schrittmachergehäuse als Anode. Bipolar bedeutet, dass die Elektroden Spitze zwar auch als Kathode dient, die Anode hingegen nun auch auf der Elektrode sitzt, ca. 2,5 cm von der Spitze entfernt. Die Kabel bipolarer Elektroden sind dadurch zwar etwas dicker und steifer, weil sie zwei Zuleitungswendeln besitzen, allerdings unempfindlicher gegenüber Potentialen, die außerhalb des Implan-



**Abb. 2:** Grundlegendes Blockschaubild eines Herzschrittmachers.

tationsortes der Elektroden Spitze liegen (beispielsweise des Skeletts oder einer weiteren Elektrode). Außerdem heben sich elektromagnetische Störungen von außen durch die zwei Zuleitungen besser auf. Bipolare Sonden werden überwiegend im Vorhof eingesetzt, weil hier eine größere Empfindlichkeit und Störfestigkeit gefragt ist, unipolare Sonden meist in der Herzkammer.

Damit die Elektroden auch wirklich nur die Herzaktivität detektieren, werden einige Parameter des natürlichen Millivolt-Signals genutzt, etwa seine Anstiegssteilheit und seine Amplitude (Wahrneh-

1) Allein 2001 wurden in Deutschland über 60000 Herzschrittmacher eingesetzt.

2) Manche Sportler, wie z. B. Lance Armstrong, können allerdings einen Ruhepuls von 32 bis 34 vorweisen.

mungsschwelle). Zur Stimulation des Herzens muss die Zellmembran mindestens einer Herzmuskelzelle depolarisiert werden, wozu mindestens 30 Millivolt nötig sind. Die tatsächlich nötige Stimulationsspannung (die sog. Reizschwelle) ist nicht nur von der Depolarisationsspannung, sondern auch von der Impulsdauer abhängig: je länger der Impuls, desto geringer die Reizschwelle, desto größer aber auch der Energieverbrauch. Der Trend heutiger Schrittmacher geht dahin, diese kontinuierliche Optimierung automatisch zu leisten, also die Impulsabgabe automatisch an die Reizschwelle anzupassen. Dazu muss der Schrittmacher diese Schwelle aber kennen, d. h. er muss wissen, ob ein Stimulationsimpuls überhaupt erfolgreich war. Er nutzt dazu die sog. evozierten Potentiale des Herzens, die aber durch das Stimulations-Nachpotential überdeckt werden können. Dieses liegt im Voltbereich, die evozierten Potenziale hingegen im Millivolt-Bereich. Eine sichere Wahrnehmung dieser wichtigen Parameter setzt also voraus, dass die Nachpotentiale möglichst klein gemacht oder zumindest schnell neutralisiert werden. Die Reduzierung kann z. B. durch besondere, niedrig polarisierende und bipolare Elektroden erreicht werden, die schnellere Neutralisierung durch eine Kapazitätsverminderung des Stimulationskondensators.

Eine kritische Stelle bei der Implantation eines Schrittmachers ist die Übergangsstelle Elektrode-Herz,

ab der Ionen den Ladungstransport im Gewebe übernehmen. Da sich an der Metallelektrode Elektronen sammeln und sich gleichzeitig Wassermoleküle an der Grenzschicht anlagern und weitere Ionen angezogen werden, bildet sich dort eine kondensatorähnliche Doppelschicht, die sog. Helmholtz-Doppelschicht, mit den Wassermolekülen als Dielektrikum. Die Polarisationsspannung dieses Kondensators addiert sich zur Schwellenspannung, die der Stimulationspuls überwinden muss, und ist von daher unerwünscht. Die Polarisationsspannung ist proportional zur Stromdichte an der Elektrodenoberfläche und ist zudem materialabhängig. Daher ist eine möglichst große Oberfläche günstig, um die Polarisationsspannung zu reduzieren. Allerdings geht dann der Simulationswiderstand zwischen Elektrode und Gewebe zurück, was eine höhere Stromentnahme aus der Batterie nach sich zieht – ein unerwünschter Effekt.

### Fraktale Kontakte

Moderne Herzschrittmacher (Abb. 3) verwenden daher Elektroden mit fraktal beschichteter Oberfläche aus Titanitrid, um die elektrisch aktive Fläche möglichst groß zu machen, die Geometrie der Elektrode aber klein zu halten. Eine solche mikroporöse Struktur erhöht die Grenzflächenkapazität gegenüber einer blank polierten Platinelektrode um den Faktor zehn und mehr und ermöglicht trotzdem Stimulationsimpedanzen bis 2000 Ohm.

Die Herzschrittmacherentwicklung der letzten Jahre war stark von der Miniaturisierung geprägt, ist diesbezüglich aber an eine gewisse Grenze gestoßen. Zukünftig wird vor allem der Systemgedanke im Vordergrund stehen, gekennzeichnet durch Home-Monitoring und Telemedizin (der Schrittmacher sendet Daten, die der Patient verfolgen und an den Arzt weiterleiten kann). In



**Abb. 3:** Moderne Herzschrittmacher wie der hier abgebildete können dank eingebauter Mikroprozessoren flexibel auf die physiologischen Bedürfnisse reagieren. (Quelle: Medtronic)

der Forschung ist der Herzschrittmacher auch als Diagnose-Werkzeug zur Erforschung chaotischer Vorgänge im Herzen („Herzkammerflimmern“) interessant. Durch Zeitreihenanalysen versucht man, innerhalb der Unregelmäßigkeiten regelmäßige Strukturen zu entdecken und Strategien zu entwickeln, wie man solche Flimmerausbrüche vorhersagen und dann mit Defibrillatoren wieder in einen normalen Sinusverlauf überführen kann.

ULRICH KILIAN

Dr. Ulrich Kilian,  
science & more  
redaktionsbüro,  
uk@science-and-  
more.de