

M. Kindermann

## Sport bei Patienten mit Herzschrittmacher

### *Sports in patients with cardiac pacemakers*

Innere Medizin III (Kardiologie, Angiologie), Universitätskliniken des Saarlandes, Homburg/Saar

#### Zusammenfassung

Die körperliche Leistungsfähigkeit eines Patienten mit künstlichem Herzschrittmacher wird bestimmt von der kardialen Grunderkrankung, seinem Trainingszustand und der verwendeten Schrittmachertechnologie. Beim AV-Block stellt der Zweikammer-Herzschrittmacher die Koppelung an die physiologische Frequenzsteuerung des Sinusknotens wieder her und ermöglicht damit prinzipiell eine normale kardiale Leistungsfähigkeit unter Belastung. Falls der Sinusknoten als physiologischer Taktgeber ausfällt, sollte bei unzureichendem Frequenzanstieg unter Belastung die Indikation zur frequenzadaptiven Stimulation geprüft werden. Sportlich ambitionierte Patienten profitieren dabei von Schrittmachersystemen, die die Herzfrequenz belastungsproportional steuern. Die Programmierung der Frequenzanpassung ist umso kritischer, je schwerer die kardiale Grunderkrankung ist, da hohe Stimulationsfrequenzen hier hämodynamisch ungünstig sind. Fazit: Es gibt keine grundsätzlichen Bedenken gegen sportliche Betätigung bei Schrittmacherpatienten. Durch eine möglichst physiologische, an das rhythmologische Problem, die kardiale Grunderkrankung und die individuellen Bedürfnisse angepasste Schrittmacherversorgung gewinnt der Patient an Lebensqualität und Leistungsfähigkeit.

**Schlüsselwörter:** Herzschrittmacher, Herzkrankheit, Sport

#### Einleitung

Obwohl die moderne Herzschrittmachertherapie eine seit langem etablierte und breit praktizierte Therapieform darstellt, sind dem Schrittmacherpatienten die Unterschiede zwischen der kardialen Grunderkrankung und der zur Schrittmacherbedürftigkeit führenden Rhythmusstörung häufig nicht bewusst. Für viele Patienten ist die Implantation eines Herzschrittmachers gleichbedeutend mit der Diagnose „herzkrank“, die eine eingeschränkte körperliche Belastbarkeit und Leistungsfähigkeit suggeriert. Es ist Aufgabe des betreuenden Arztes, diese Vorstellungen zu korrigieren und den Patienten seiner Grunderkrankung entsprechend zu beraten. Auf der anderen Seite hat mit dem zunehmenden Stellenwert der körperlichen Aktivität für die Primär- und Sekundärprävention kardiovaskulärer Erkrankungen auch der Anteil körperlich aktiver Schrittmacherpatienten zugenommen. Diese Patienten wollen nicht nur über die Grenzen ihrer Belastbarkeit aufgeklärt werden. Insbesondere sportlich aktive Patienten erwarten eine optimierte

#### Summary

In patients with cardiac pacemakers, exercise capacity is determined by underlying heart disease, training status and pacemaker technology. In patients with AV-block, dual-chamber pacing restores an atrially triggered atrioventricular contraction sequence driven by the sinus node and allows for a rather normal increase in cardiac output during exercise. If abnormal sinoatrial function precludes the use of the sinus node for rate control, the indication for rate adaptive pacing should be checked. Patients engaged in sporting activities benefit from rate-adaptive pacing systems which provide pacing rates that are proportional to the level of metabolic demand. The adjustment of algorithms used for rate-adaptive pacing is more crucial in the presence of severe structural heart disease, because in this setting, high pacing rates may become hemodynamically disadvantageous. Conclusion: There are no principal objections to sporting activities in pacemaker patients. Using the most physiologic pacing system which is adapted to the basic rhythm disorder, the underlying heart disease and to individual demands will enhance exercise performance and quality of life.

**Keywords:** cardiac pacemaker, heart disease, sporting activities

Schrittmacherversorgung, die den individuellen Leistungsspielraum maximal ausschöpft. Der Informationsbedarf dieser Patienten ist hoch und angesichts der erforderlichen Spezialkenntnisse über Schrittmachertechnologie auch vom betreuenden Arzt nicht leicht zu befriedigen.

Diese Arbeit gibt eine Einführung in die Grundlagen der modernen Schrittmachertherapie, sie soll dazu beitragen, Schrittmacherpatienten kompetent und kritisch beraten zu können und Kenntnisse darüber vermitteln, wie die Wahl des Schrittmachersystems die körperliche Leistungsfähigkeit des Patienten beeinflussen kann.

#### Grundzüge der modernen Schrittmachertherapie – der technische Aspekt

Die Implantation eines Herzschrittmachers ist grundsätzlich indiziert bei einer symptomatischen Bradykardie, sofern diese nicht durch äußere, leicht korrigierbare Umstände (z.B.

Einnahme bradykardisierender Medikamente) verursacht wird (6, 11). Das Ziel der modernen Schrittmachertherapie besteht darin, die zugrundeliegende bradykarde Rhythmusstörung möglichst physiologisch zu korrigieren, um subjektive Nebenwirkungen der Schrittmacherstimulation zu vermeiden und die Pumpleistung des Herzens zu optimieren. Der Schrittmacher sollte daher nicht nur eine Adams-Stokes-Anfälle verhindernde Mindestherzfrequenz garantieren, sondern auch die physiologische Kontraktionsabfolge von Vorhof und Kammer und den physiologischen Herzfrequenzanstieg bei gesteigertem metabolischen Bedarf aufrechterhalten oder wiederherstellen (11).

nes adäquaten Herzfrequenzanstieges bedeutsamer und hinter der Steigerung der Sauerstoffausschöpfung der zweitwichtigste Adaptationsmechanismus zur Steigerung der Sauerstoffaufnahme. Eine in jeder Hinsicht vollkommen physiologische Herzfrequenzsteuerung ist nach der Implantation eines Herzschrittmachers nur zu erwarten, wenn ein Patient mit einer isolierten Funktionsstörung des AV-Knotens einen Zweikammerschrittmacher erhalten hat. In diesem Fall wird die Herzfrequenz wie im gesunden Herzen vom Sinusknoten geregelt, der Schrittmacher übernimmt lediglich die Funktion der atrioventrikulären Überleitung, er greift die Vorhoffrequenz ab und stimuliert vorhofgesteuert die Herz-

kammer (Abb. 1, rechts, Bildmitte). Sofern diese Patienten außer dem AV-Block keine weitere kardiale oder extrakardiale Erkrankung aufweisen, zeigen sie eine weitgehend normale kardiopulmonale Leistungsfähigkeit.

Eine inadäquate Herzfrequenzanpassung unter Belastung, die sogenannte chronotrope Inkompetenz, ist meist Folge einer Sinusknotenerkrankung. Nur beim bradyarrhythmischen Vorhofflimmern ist sie Ausdruck der eingeschränkten Überleitungskapazität eines ebenfalls geschädigten AV-Knotens. Nicht alle Patienten

mit einer pathologischen Bradykardie in Ruhe weisen auch einen unzureichenden Herzfrequenzanstieg unter Belastung auf: nach Implantation eines Herzschrittmachers, der nicht über die Fähigkeit verfügt, seine Stimulationsfrequenz an das Belastungsniveau des Patienten anzupassen, findet sich ein inadäquater Frequenzanstieg unter Belastung bei etwa 30 bis 75 % der Patienten (12, 19). Die beiden Enden dieser Skala werden markiert durch Patienten, die wegen eines AV-Blockes (30 % chronotrope Inkompetenz) und wegen einer

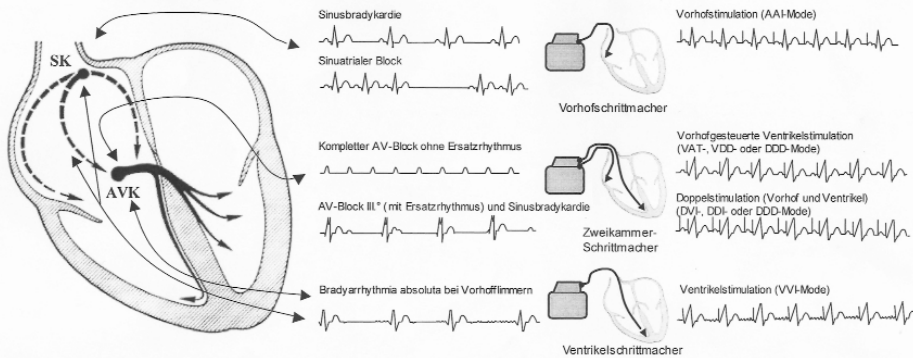


Abbildung 1: Links: Das Erregungsbildungs- und Reizleitungssystem des menschlichen Herzens. SK: Sinusknoten, AVK: Atrioventrikulärer Knoten. Mitte: typische EKG-Morphologie bei Funktionsstörungen des Sinus- und AV-Knotens. Der Bradyarrhythmia absoluta bei Vorhofflimmern liegt eine kombinierte Funktionsstörung des Sinusknotens, des Reizleitungssystems der Vorhöfe und des AV-Knotens zugrunde. Rechts: typische EKG-Morphologie nach Korrektur der bradykarden Rhythmusstörung durch „maßgeschneiderte“ Schrittmacherversorgung. Zusätzlich angegeben ist die Kurzbezeichnung der Schrittmacher-Betriebsarten (AAI, VAT, u.s.w.), mit denen sich diese Stimulationsformen verwirklichen lassen (näheres bei 3)

Der Erhalt der atrioventrikulären Kontraktionssequenz wird gewährleistet durch den Einsatz vorhofbeteiligender Schrittmachersysteme in allen Fällen, in denen der Vorhof zuverlässig elektrisch stimuliert oder wahrgenommen werden kann. Dies bedeutet, dass im Falle einer isolierten Sinusknotenfunktionsstörung zweckmäßigerweise ein Vorhofschrittmacher und bei Erkrankungen des AV-Knotens sowie bei binodalen Funktionsstörungen ein Zweikammer-Schrittmacher implantiert wird (Abb. 1). Es ist anzumerken, dass die Implantation des klassischen Einkammer-Ventrikelschrittmachers im wesentlichen dem bradykarden Vorhofflimmern vorbehalten ist. Bei Patienten mit erhaltenem Sinusrhythmus ist die Versorgung mit einem Ventrikelschrittmacher dann gerechtfertigt, wenn der Patient seltene symptomatische Asystolien aufweist und außerhalb dieser Episoden keiner Schrittmacherstimulation bedarf. Auch wenn in jüngster Zeit der Stellenwert der physiologischen Schrittmacherversorgung erneut kontrovers diskutiert wird (24), entspricht diese Einschränkung des Indikationsspektrums der Ventrikelschrittmacherstimulation den gültigen Richtlinien der nationalen und internationalen Fachgesellschaften (6, 11).

Die Aufrechterhaltung einer zeitlich koordinierten Kontraktion von Vorhof und Kammer dient in erster Linie der Normalisierung der Ruhehämodynamik und der Vermeidung von Vorhoffropfungen. Wie Abbildung 2 exemplarisch darstellt, ist für die Belastungshämodynamik die Möglichkeit ei-

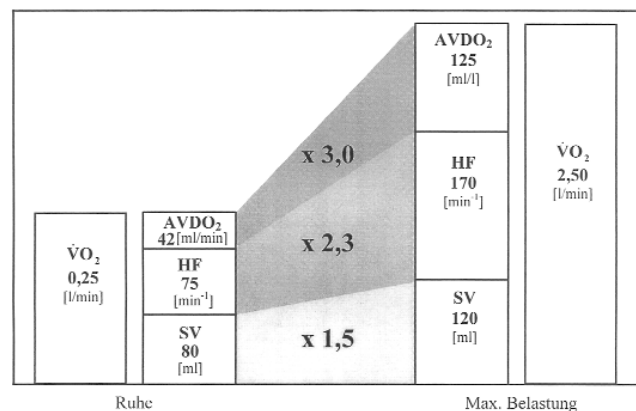


Abbildung 2: Belastungshämodynamik am Beispiel einer 50-jährigen Normalperson.  $\dot{V}O_2$ : Sauerstoffaufnahme, AVDO<sub>2</sub>: arteriovenöse Sauerstoffdifferenz, HF: Herzfrequenz, SV: Schlagvolumen.

Bradyarrhythmia absoluta (75 % chronotrope Inkompetenz) einen Herzschrittmacher erhalten haben. Mit Hilfe sogenannter frequenzadaptiver Schrittmacheraggregate ist es möglich geworden, über die Ausschaltung von Asystolien und die Korrektur der Ruheherzfrequenz hinaus Einfluss auf den Frequenzverlauf unter Belastung zu nehmen. Das technische Prinzip der frequenzadaptiven Stimulation besteht darin, über einen Sensor ein Biosignal zu detektieren, das anzeigt, ob der Patient körperlich aktiv ist und wie sein

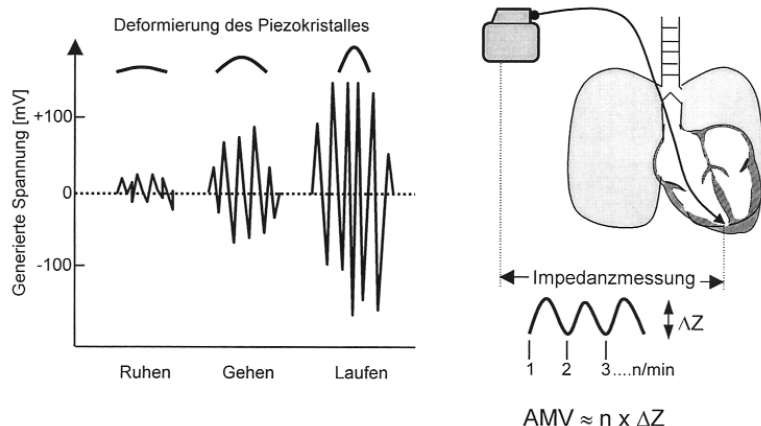


Abbildung 3: Beispiele zweier gebräuchlicher Prinzipien zur frequenzadaptiven Stimulation. Links: „Aktivitäts-Sensor“. Rechts: „Atemminutenvolumen (AMV)-Sensor“. Das AMV wird indirekt abgeschätzt, indem der zeitliche Verlauf des elektrischen Wechselstromwiderstandes (Impedanz) zwischen dem Schrittmachergehäuse und der Elektroden Spitze registriert wird. Das Produkt aus der Frequenz (n) und der Amplitude der Impedanzschwankungen ( $\Delta Z$ ) korreliert mit dem AMV.

Aktivitätsniveau einzuschätzen ist. Der Sensor steuert dann im idealen Fall belastungsproportional die Stimulationsfrequenz des Schrittmachers.

Zwei der am häufigsten verwendeten Sensoren, der „Aktivitäts-Sensor“ und der „Atemminutenvolumen-Sensor“, sind in Abbildung 3 dargestellt. Der Aktivitäts-Sensor (2) ist vor allem wegen des geringen technischen Aufwandes das mit Abstand am häufigsten verwendete System zur frequenzadaptiven Stimulation. Er nutzt die bei körperlicher Aktivität auftretenden Erschütterungen, die als Beschleunigungskräfte auf einen im Schrittmacher implementierten Piezo-Kristall übertragen werden. In Abhängigkeit vom Aktivitätsniveau verformt sich der Piezo-Kristall und generiert eine annähernd belastungsproportionale elektrische Spannung (piezoelektrischer Effekt), deren Amplitude das Ausmaß der Frequenzänderung bestimmt. Der Aktivitätssensor erfasst verzögerungsfrei Anfang und Ende einer körperlichen Belastung, Hauptnachteil ist die unzureichende Korrelation des Sensorsignales mit dem tatsächlichen metabolischen Bedarf. So verliert der Aktivitätssensor im Verlauf einer ansteigenden körperlichen Belastung seine Belastungsproportionalität, auf bestimmte Belastungsformen (Fahrradergometer) reagiert er nicht empfindlich genug (mangelnde Sensitivität), nicht belastungsbedingte Erschütterungen und Vibrationen des Körpers, wie sie beispielsweise beim Reiten oder Motorradfahren auftreten, führen zu einer fehlerhaften Sensoraktivierung (mangelnde Spezifität), die unangenehmes Herzklopfen hervorrufen kann.

Im Unterschied zum Aktivitäts-Sensor gilt der „Atemminutenvolumen-Sensor“ (AMV-Sensor) als ein physiologi-

sches Sensor-Prinzip (16), da er mit dem Atemminutenvolumen eine Steuergröße benutzt, die zumindest bis zur anaeroben Schwelle linear mit dem metabolischen Bedarf korreliert. Nachteil des AMV-Sensors ist das verzögerte Ansprechverhalten bei Beginn der Belastung, was jedoch durch Kombination mit einem Aktivitätssensor korrigiert werden kann (sogenanntes „Sensor-Blending“). Sportlich aktive Schrittmacherpatienten mit chronotroper Inkompetenz sollten nach Möglichkeit einen Schrittmacher erhalten, der über einen solchen physiologischen Sensor verfügt, da auf diese Weise auch bei andauernder körperlicher Belastung eine adäquate Stimulationsfrequenz zur Verfügung gestellt wird.

Bei Patienten mit erhaltener intrinsischer Frequenzregulation unter Belastung kann durch eine frequenzadaptive Stimulation keine Verbesserung der Leistungsfähigkeit mehr erreicht werden (1, 5, 7). Diese Patienten reagieren auf eine schrittmachergesteuerte Frequenzadaptation häufig mit als sehr störend empfundenen Palpitationen und zeigen eine messbare Einschränkung ihrer Lebensqualität (7). Daher ist die kritiklose Anwendung frequenzadaptiver Stimulationsmodi grundsätzlich abzulehnen. Als Faustregel für die Indikationsstellung kann gelten, dass eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch frequenzvariable Stimulation in der Regel nur dann zu erwarten ist, wenn die intrinsische Herzfrequenz bei maximaler, symptomlimitierter Belastung 100 (6) bis 110/min (1) nicht überschreitet und / oder wenn die Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle unter 90 (7) bis 95/min (14) liegt. Da diese Grenzwerte aber vom Lebensalter, dem Trainingszustand und der kardialen Komorbidität abhängen, muss gerade bei jungen, sportlich aktiven Schrittmacherpatienten die Indikation zur frequenzvariablen Stimulation im Einzelfall geprüft werden. Hierzu eignen sich speziell für diese Fragestellung erarbeitete Ergometrieprotokolle, die den beobachteten spontanen Frequenzanstieg während Belastung in Relation setzen zum kalkulierten metabolischen Bedarf (13).

## Die Bedeutung der kardialen Grundkrankheit

Die Leistungsfähigkeit eines Schrittmacherpatienten wird nicht nur vom Trainingszustand und der verwendeten Schrittmachertechnologie sondern ganz wesentlich auch von der kardialen Grunderkrankung bestimmt. Es ist den meisten Schrittmacherpatienten nicht bewusst, dass ihre Belastbarkeit, das heißt das Belastungsniveau, dem sie sich schadlos aussetzen dürfen, keineswegs vom Herzschrittmacher abhängt, sondern vom Vorliegen einer relevanten strukturellen Herzerkrankung. Es ist Aufgabe des betreuenden Arztes zu verhindern, dass ein sportlich aktiver Patient ohne schwerwiegende Herzerkrankung die Implantation eines Schrittmachers als Hinweis auf den schlechten Zustand seines Herzens missversteht und in Folge auf sportliche Aktivitäten verzichtet. Auf der anderen Seite muss ein schwer

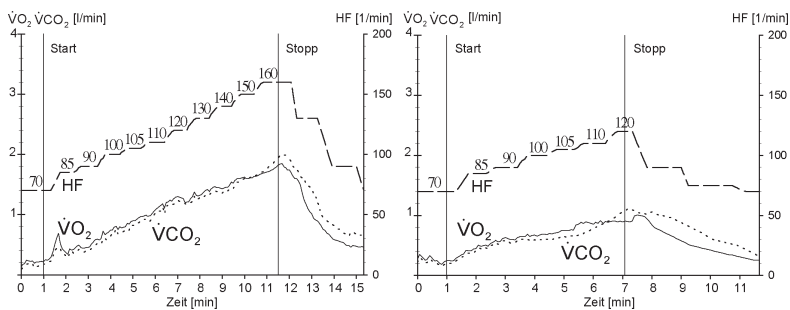


Abbildung 4: Bestimmung der optimalen Maximalfrequenz unter körperlicher Belastung mittels Spiroergometrie. Die Herzfrequenz (HF) wird jeweils von außen durch Programmierung des Schrittmachers gesteigert. Links: 71-jähriger Patient mit normaler linksventrikulärer Pumpfunktion (EF 80%), dessen O<sub>2</sub>-Aufnahme bis zum Ende der Belastung und bis zu einer maximalen Stimulationsfrequenz von 160/min (= Optimum) ansteigt. Rechts: 58-jähriger Patient mit schwerer linksventrikulärer Dysfunktion (EF 30%). Trotz weiter ansteigender Last und Frequenz nimmt die O<sub>2</sub>-Aufnahme nur bis zu einer Stimulationsfrequenz von 110/min (= Optimum) zu. Auffällig ist ein kurzfristiger, erneuter Anstieg der O<sub>2</sub>-Aufnahme unmittelbar nach Belastung, der offenbar durch eine Senkung der Stimulationsfrequenz ausgelöst wird.

herzkranker Patient mit bradykarden Herzrhythmusstörungen darüber aufgeklärt werden, dass durch die Implantation eines Schrittmachers nur die Symptome der Bradykardie, nicht jedoch die Herzkrankheit an sich beseitigt werden.

Grundsätzlich ist zu betonen, dass besonders herzinsuffiziente Patienten im Falle einer schrittmacherbedürftigen bradykarden Rhythmusstörung von der Versorgung mit einem physiologischen Schrittmachersystem profitieren. Da bei eingeschränkter Pumpfunktion auch vom Absolutbetrag her kleine Verbesserungen der Hämodynamik relativ bedeutsam sind, sollte die Nachsorge des herzinsuffizienten Schrittmacherpatienten eine individuelle, hämodynamische Optimierung der Schrittmachereinstellungen beinhalten. Dazu gehört z.B. bei Zweikammer-Systemen die an die zugrundeliegende Rhythmusstörung angepasste Wahl der günstigsten atrioventrikulären Verzögerung (sogenannte AV-Delay-Optimierung) (4, 8, 9, 25). Wichtigstes Hilfsmittel dabei ist die Echokardiographie (9).

Zwischen der Belastungshämodynamik des gesunden und des kranken Herzens gibt es gravierende Unterschiede, die bei der Betreuung von körperlich aktiven Schrittmacherpatienten beachtet werden müssen. Während bei einem gesunden Herzen das Herzzeitvolumen unter Belastung bis in sehr hohe Frequenzbereiche proportional zum Herzfrequenzanstieg verläuft, erzeugt das kranke Herz sein maximales Herzzeitvolumen bei Frequenzen, die deutlich unterhalb der maximalen altersentsprechenden Herzfrequenz liegen (22). Eine Steigerung der Frequenz über diese optimale obere Grenze hinaus beeinträchtigt die Pumpfunktion, das Schlagvolumen kann so stark fallen, dass trotz Frequenzsteigerung das Herzzeitvolumen wieder abnimmt. Als Ursachen für diese Tachykardieintoleranz kommen der Verlust der positiven Kraft-Frequenz-Relation (Bowditch-Effekt) (21), eine Verschlechterung der diastolischen Füllung (17) mit konsekutiver Schlagvolumenabnahme und pulmonalvenöser Kongestion und die Induktion einer Ischämie in Frage.

Da in den letzten Jahren die Bewegungstherapie als nichtmedikamentöse Therapieoption bei schwerer Herzinsuffizienz zunehmenden Stellenwert gewinnt, ist auch der körperlich aktive Schrittmacherpatient mit schwerer struktureller Herzkrankheit keine Rarität mehr. Die Programmierung des Schrittmacheraggregates bei diesen Patienten stellt eine besondere Herausforderung dar. Liegt eine chronotrope Inkompetenz vor, so muss bei der Adjustierung der Frequenzanpassung die maximale Stimulationsfrequenz auf das individuelle Optimum begrenzt werden. Zur Bestimmung dieses individuellen Optimums der oberen Stimulationsfrequenz hat unsere Arbeitsgruppe eine spiroergometrische Methode vorgeschlagen (20), die auf der Beurteilung der Kinetik der Sauerstoffaufnahme am Belastungsende beruht (Abb. 4). Diese Methode erscheint uns besonders hilfreich bei jungen, körperlich noch sehr aktiven Schrittmacherpatienten. Hier ist die Kluft zwischen der theoretischen, maximalen Herzfrequenz (z.B. 220 - Lebensalter) (23) und der durch die Herzerkrankung bedingten Tachykardieintoleranz prinzipiell am größten, so dass schematische Entscheidungen nicht adäquat erscheinen und grundsätzlich eine individuelle Optimierung des Schrittmachers erfolgen sollte.

## Traumatische Schädigung von Schrittmacher oder Elektroden

Jüngere Schrittmacherpatienten unterscheiden sich in Art und Umfang ihrer Freizeitaktivitäten kaum von gleichaltrigen Menschen ohne Herzschrittmacher (Abb. 5) (15). Dies lässt darauf schließen, dass nach sachgerechter Aufklärung die überwiegende Zahl der Patienten die Implantation eines Herzschrittmachers nicht als Stigmatisierung wahrnimmt,

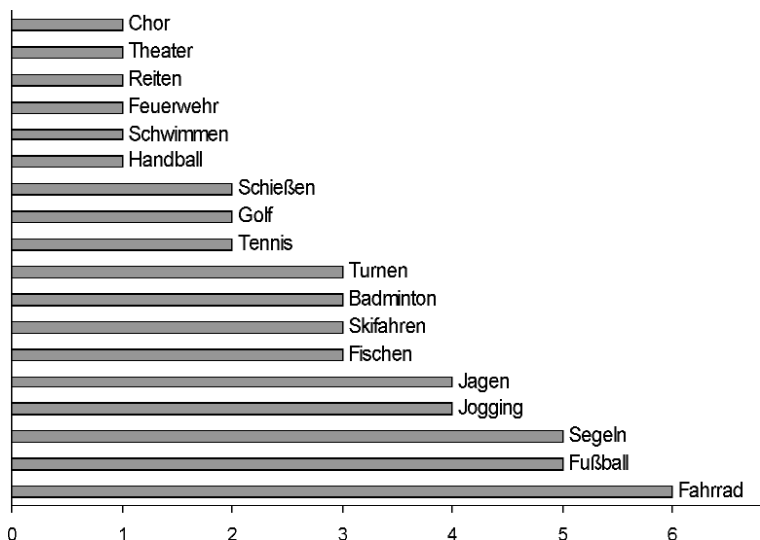


Abbildung 5: Freizeitaktivitäten (absolute Häufigkeiten) bei 72 Herzschrittmacherpatienten im Alter zwischen 20 und 60 Jahren. 36 von 72 Patienten (50%) gaben mindestens eine der genannten Aktivitäten an (nach 15).

sondern zur Normalität des Lebens zurückkehrt. Hierzu hat in den letzten Jahrzehnten auch der technische Fortschritt beigetragen: die miniaturisierten Schrittmacheraggregate unserer Tage weisen nur noch einen Bruchteil des Volumens ihrer frühen Vorgänger auf und sind auch bei sehr schlanken Menschen in der Regel kosmetisch unauffällig zu implantieren. Verbesserte Materialien für die Schrittmachersonden gewährleisten heute eine hohe Robustheit und Langzeitstabilität, so dass Rezidiveingriffe nach Schrittmacherimplantation überwiegend auf den nach 5 bis 10 Jahren fälligen Batteriewechsel beschränkt bleiben.

Dennoch ist nach Implantation eines physiologischen Schrittmachersystems durch einen erfahrenen Operateur auch heute noch mit einer Gesamtrate an vorzeitigen Reoperationen von 5% zu rechnen, wobei etwa die Hälfte davon Folge eines Elektrodendefekts ist und die andere Hälfte auf Komplikationen im Bereich der Schrittmachertasche zurückgeht (10). Grundsätzlich besteht bei sportlichen Aktivitäten, die mit einer einseitigen hohen Belastung der oberen Extremität einhergehen, die Möglichkeit einer traumatischen Schädigung der Schrittmacherelektroden in ihrem Verlauf zwischen erster Rippe und dem Schlüsselbein (18). Sportlich aktive Menschen müssen nach Schrittmacherimplantation jedoch nicht auf ihr Tennis-, Squash- oder Golfspiel verzichten. In diesen Fällen ist es aber ratsam, das Schrittmacheraggregat kontralateral zum Schlagarm zu implantieren. Von Kampfsportarten, bei denen das Schrittmacheraggregat oder der Elektrodenkonnektor durch direkte Schlageinwirkung beschädigt werden können, ist grundsätzlich abzuraten. Darüber hinaus gibt es keine generellen Restriktionen bezüglich der Ausübung bestimmter Sportarten.

## Schlussfolgerung

Nicht das Merkmal „Herzschrittmacher“, sondern Grundkrankheit, Trainingszustand und das Ausschöpfen moderner Schrittmachertechnologien bestimmen die kardiopulmonale Leistungsfähigkeit von Schrittmacherpatienten. Mit wenigen Ausnahmen stehen die meisten sportlichen Aktivitäten grundsätzlich auch Patienten mit implantierten Herzschrittmachern zur Verfügung.

## Literatur

1. Alt EU, Schlegl MJ, Matula MM: Intrinsic heart rate response as a predictor of rate-adaptive pacing benefit. *Chest* 107 (1995) 925-930.
2. Benditt DG, Duncan JL: Activity-sensing, rate-adaptive pacemakers, in: Ellenbogen KA, Kay GN, Wilkoff BL (eds.): *Clinical cardiac pacing*. W.B. Saunders, Philadelphia, 1995, 167-186.
3. Bernstein AD, Camm AJ, Fletcher RD, Gold RD, Rickards AF, Smyth NP, Spielman SR, Sutton R: The NASPE / BPEG generic pacemaker code for antibradyarrhythmia and adaptive-rate pacing and antitachyarrhythmia devices. *Pacing Clin Electrophysiol* 10 (1987) 794-799.
4. Brecker SJ, Xiao HB, Sparrow J, Gibson DG: Effects of dual-chamber pacing with short atrioventricular delay in dilated cardiomyopathy. *Lancet* 340 (1992) 1308-1312.
5. Dickhuth HH, Heitkamp HC, Konz KH, Röcker K, Haasis R: Leistungsfähigkeit, Herzfrequenzverhalten und sympathische Regulation von Schrittmacherpatienten im frequenzadaptierten (VVI-R, DDD-R) und nicht sensorgesteuerten Modus (DDD). *Dtsch Z Sportmed* 48 (1997) 324-329.
6. Dreifus LS, Fisch C, Griffin JC, Gilette PC, Mason JW, Parsonnet V: Guidelines for implantation of cardiac pacemakers and antiarrhythmia devices. A report of the American College of Cardiology / American Heart Association Task Force on Assessment of Diagnostic and Therapeutic Cardiovascular Procedures Committee. *Circulation* 84 (1991) 455-467.
7. Epperlein S, Kreft A, Siegert V, Liebrich A, Himmrich E, Treese N: DDD-versus DDDR-Schrittmacherstimulation: Vergleich der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit, der Häufigkeit von Vorhoffarrhythmien und der Lebensqualität. *Z Kardiol* 85 (1996) 226-236.
8. Iliiev II, Yamachika S, Muta K, Hayano M, Ishimatsu T, Nakao K, Komiya N, Hirata T, Ueyama C, Yano K: Preserving normal ventricular activation versus atrioventricular delay optimization during pacing: the role of intrinsic atrioventricular conduction and pacing rate. *Pacing Clin Electrophysiol* 23 (2000) 74-83.
9. Kindermann M, Fröhlig G, Doerr T, Schieffer H: Optimizing the AV delay in DDD pacemaker patients with high degree AV block: mitral valve Doppler versus impedance cardiography. *Pacing Clin Electrophysiol* 20 (1997) 2453-2462.
10. Kindermann M, Schwaab B, Berg M, Fröhlig G: Longevity of dual chamber pacemakers: device and patient related determinants. *Pacing Clin Electrophysiol* 24 (2001) 810-815.
11. Lemke B, Fischer W, Schulten HK: Richtlinien zur Herzschrittmachertherapie. Indikationen, Systemwahl, Nachsorge. *Z Kardiol* 85 (1996) 611-627.
12. Luki J, Doupal V, Sovova E, Lubena L: Incidence and significance of chronotropic incompetence in patients with indications for primary pacemaker implantation or pacemaker replacement. *Pacing Clin Electrophysiol* 22 (1999) 1284-1291.
13. McElroy PA, Janicki JS, Weber KT: Physiologic correlates of the heart rate response to upright isotonic exercise: relevance to rate-responsive pacemakers. *J Am Coll Cardiol* 11 (1988) 94-99.
14. Meine M, Israel CW, Wehmeier K, Elker N, Mügge A, Werner J: Welche Patienten profitieren von einer physiologischen frequenzadaptiven Schrittmachertherapie? *Herzschr Elektrophys* 11 (2000) 27-28.
15. Mickley H, Petersen J: Leisure activities and sports in younger pacemaker patients. *Ugeskr Laeger* 151 (1989) 2713-2715.
16. Nappholz T, Maloney JD, Kay GN: Rate-adaptive pacing based on impedance-derived minute ventilation, in: Ellenbogen KA, Kay GN, Wilkoff BL (eds.): *Clinical cardiac pacing*. W.B. Saunders, Philadelphia, 1995, 219-233.
17. Ng KS, Gibson DG: Impairment of diastolic function by shortened diastolic filling period in severe left ventricular disease. *Br Heart J* 62 (1989) 246-252.
18. Schuger CD, Mittleman R, Habbal B, Wagshal A, Huang SK: Ventricular lead transection and atrial lead damage in a young softball player shortly after the insertion of a permanent pacemaker. *Pacing Clin Electrophysiol* 15 (1992) 1236-1239.
19. Schwaab B, Fröhlig G, Schwerdt H, Lindenberg I, Schieffer H: Rate adaptive atrial pacing in the bradycardia tachycardia syndrome. *Pacing Clin Electrophysiol* 21 (1998) 2571-2579.
20. Schwaab B, Kindermann M, Berg M, Kusch O, Fröhlig G, Schieffer H: Das Plateau der maximalen Sauerstoffaufnahme in der Spiroergometrie - ein geeigneter Parameter zur Bestimmung der optimalen oberen Grenzfrequenz bei frequenzadaptiver Schrittmacherprogrammierung? *Herzschr Elektrophys* 11 (2000) 29-30.
21. Schwinger RH, Bohm M, Koch A, Erdmann E: Force-frequency relation in human heart failure. *Circulation* 86 (1992) 2017-2018.
22. Sowton E: Haemodynamic studies in patients with artificial pacemakers. *Br Heart J* 26 (1963) 737-746.
23. Tanaka H, Monahan KD, Seals DR: Age-predicted maximal heart rate revisited. *J Am Coll Cardiol* 37 (2001) 153-156.
24. Wiegand UKH: VVI versus physiologic pacing. New data on an old topic. *Herzschr Elektrophys* 11 (2000) II/43-II/48.
25. Wish M, Fletcher RD, Gottdiener JS, Cohen AI: Importance of left atrial timing in the programming of dual chamber pacemakers. *Am J Cardiol* 60 (1987) 566-571.

Korrespondenzadresse:

Dr. Michael Kindermann

Innere Medizin III (Kardiologie, Angiologie)

Universitätskliniken des Saarlandes

66421 Homburg/Saar

e-mail: michael.kindermann@t-online.de