
K. Stangl, H. Heuer, A. Wirtzfeld

Frequenzadaptive Herzschrittmacher

Physiologie, Technologie,
klinische Ergebnisse

unter Mitarbeit von
B. Frenking, R. Heinze, T. Koch,
M. Laule



Steinkopff Verlag Darmstadt

Dr. Karl Stangl
I. Medizinische Klinik
der TU München
Ismaninger Straße 22
8000 München

PD Dr. Hubertus Heuer
St. Johannes-Krankenhaus
Abteilung Kardiologie
Johannesstraße
4600 Dortmund

Prof. Dr. Alexander Wirtzfeld
Medizinische Klinik
Klinikum Ingolstadt
Krumenauer Straße
8470 Ingolstadt

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Frequenzadaptive Herzschrittmarker: Physiologie, Technologie, klinische Ergebnisse/K. Stangl;
H. Heuer; A. Wirtzfeld. Unter Mitarb. von B. Frenking . . . – Darmstadt: Steinkopff, 1990

NE: Stangl, Karl [Mitverf.]; Heuer, Hubertus [Mitverf.]; Wirtzfeld, Alexander [Mitverf.]

ISBN-13: 978-3-642-85389-0 e-ISBN-13: 978-3-642-85388-3

DOI: 10.1007/978-3-642-85388-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Copyright © 1990 by Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, GmbH & Co. KG, Darmstadt

Verlagsredaktion: Sabine Müller – Herstellung: Heinz J. Schäfer

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1990

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in dieser Veröffentlichung berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satzherstellung: Typoservice, Alsbach-Hähnlein

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Geleitwort

Die Herzschrittmachertherapie zählt zweifelsohne zu den großen Fortschritten medizinischer Erkenntnisse der letzten dreißig Jahre. Menschen, deren Leben bis auf einige wenige Jahre begrenzt war, bekamen es neu geschenkt. Ihre Lebenserwartung konnte nachhaltig verlängert, ihre Lebensqualität entscheidend verbessert werden. Die Schrittmacherentwicklung ist aber nicht stehengeblieben. Gerade zur Verbesserung der Lebensqualität konnten in der Entwicklung der letzten Jahre große Fortschritte erzielt werden. Das ursprüngliche Therapiekonzept war die Verhinderung von Adams-Stokes-Anfällen, zunächst beim kompletten AV-Block, aber schon sehr rasch bei allen bradykarden Rhythmusstörungen. Einen wesentlichen Fortschritt stellte hierzu die Einführung der Demand-Funktion dar, die eben nur im Bedarfsfall, d.h. beim plötzlichen rhythmogenen Ausfall der Herztätigkeit, einsetzte, das asystolische Intervall überbrückte und damit den Adams-Stokes-Anfall verhinderte, ohne sonst die Herztätigkeit zu stören. Das nächste Therapiekonzept betraf die Verbesserung der Hämodynamik mit dem Ziel, durch Anhebung der zu langsamen Ruhfrequenz eine Steigerung des Herzminutenvolumens herbeizuführen. Sehr rasch mußte man jedoch erkennen, daß gerade bei der Hauptgruppe dieser Patienten, d.h. Patienten mit Sinusbradykardie, der gewünschte Effekt in vielen Fällen ausblieb. Trotz Frequenzanhebung ging es einem Teil dieser Patienten eher schlechter, in manchen Fällen kam es sogar zu Blutdruckabfall und kollapsähnlichen Zuständen. Der Begriff „Schrittmachersyndrom“ kam auf. Die Lösung für solche Fälle war die Einführung der Vorhofstimulation (AAI), die wiederum die Entwicklung geeigneter Vorhofelektroden und Implantationstechniken zur Voraussetzung hatte. Damit ließ sich die Herzfrequenz anheben bei Erhalt der AV-Überleitung, d.h. physiologischer AV-Synchronisation (physiologischer Schrittmacher). Dem gegenüber stand der Nachteil, daß eine sich evtl. später entwickelnde AV-Überleitungsstörung durch die Vorhofstimulation allein nicht behoben werden konnte und der AAI-Schrittmacher bei Auftreten von Vorhofflimmern ineffektiv wurde. Zur Diskussion stand deshalb auch hier die zusätzliche Kammerstimulation, d.h. ein Zweikammersystem.

Der Nachteil aller bisher genannten Systeme lag darin, daß zwar die Ruhfrequenz dieser Patienten gewährleistet werden konnte, ihre Belastungsfähigkeit jedoch durch die fehlende Frequenzsteigerung erheblich eingeschränkt war. Der eigentliche Schritt zur hämodynamischen Verbesserung war die Entwicklung der Zweikammersysteme für Patienten mit totalem AV-Block; damit war nicht nur die normale AV-Synchronität garantiert, sondern auch das normale sinuale Frequenzverhalten wiederhergestellt. Diese Patienten hatten ihr normales Frequenzverhalten wiedergewonnen, waren also jederzeit in der Lage, ihre Frequenz der Belastung angepaßt zu steigern.

Übrig blieben die Patientengruppen mit Dysfunktion oder Fehlen der Sinusaktion, die nicht nur durch eine symptomatische Bradykardie, sondern auch durch das Unvermögen einer ausreichenden Frequenzsteigerung charakterisiert waren. Hier mußten neue Wege zu einer möglichen Frequenzsteigerung gefunden werden, und zwar unabhängig von der Sinusknotenfunktion. Auf der Suche nach solchen vorhofunabhängigen biologischen Signalen wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Parametern getestet. Als geeignete

Sensoren haben sich dabei Aktivität, das QT-Intervall, Atmungsparameter und Bluttemperatur erwiesen. Andere physiologische Parameter wie die zentralvenöse Sauerstoffsättigung, Druckparameter des rechten Herzens und andere sind ebenfalls in klinischer Erprobung. Die technische Weiterentwicklung macht über das einzelne Signal hinaus Multisensorsysteme möglich, die zunehmend Anwendung finden werden. Durch solche Systeme kann eine nahezu optimale Adaptation der Herzfrequenz an die jeweiligen Stoffwechselbedürfnisse des Körpers erzielt werden.

Im Rahmen der frequenzadaptiven Stimulation hat sich gezeigt, daß der AV-Synchronität keineswegs die Bedeutung zukommt, die früher vermutet wurde; vielmehr ist die Zunahme des Herzminutenvolumens unter Belastung im wesentlichen auf die Steigerung der Herzfrequenz zurückzuführen. Die kontroverse Diskussion um die Bedeutung der beiden Größen Frequenz (VVIR) versus AV-Synchronität (DDD) ist jedoch mit der Entwicklung frequenzadaptiver Zweikammersysteme, die zur Frequenzadaptation auch die AV-Synchronität gewährleisten, mittlerweile bereits überholt. Mit dem Einsatz der frequenzadaptiven Stimulation in Ein- und Zweikammersystemen kann somit bei den drei Hauptindikationen AV-Block, Sinusknotensyndrom und Bradyarrhythmie eine mangelnde oder fehlende Frequenzadaptation weitgehend kompensiert werden.

Für die Behandlung bradykarder Rhythmusstörungen haben die heute gebräuchlichen frequenzadaptiven Schrittmachersysteme einen klinisch akzeptablen technischen Stand erreicht. Die zukünftige Entwicklung geht zweifelsohne in Richtung universaler Schrittmacher mit antibradykarden und antitachykarden Eigenschaften. Dabei ermöglicht die Kombination von antitachykarden Stimulationsmodi und Schockapplikation das Hauptrisiko der Terminierung ventrikulärer Tachykardien, nämlich die Degeneration zu Kammerflimmern, zu beherrschen. Die enorme Herausforderung an die Technik, die solche zukünftigen Geräte hinsichtlich Zuverlässigkeit, Größe, Gewicht, Lebensdauer und nicht zuletzt der Kosten stellen, ist offensichtlich.

München, Januar 1990

Prof. Dr. Hans Blömer

Vorwort

Nach der Entwicklung der Zweikammerschrittmacher Anfang der 80er Jahre stellen die vorhofunabhängigen, frequenzadaptiven Systeme die neueste Forschungs- und Entwicklungsrichtung am Ausklang der dritten und zu Beginn der vierten Dekade der Herzschrittmachertherapie dar. Frequenzadaptive Systeme haben Eingang in die Schrittmacherbehandlung gefunden und eröffnen neue therapeutische und diagnostische Möglichkeiten. Ihre zunehmende Bedeutung wird dadurch eindrucksvoll belegt, daß der erste verfügbare Aktivitätsschrittmacher das bereits am häufigsten implantierte System seit Beginn der Herzschrittmachertherapie überhaupt ist. Bei der stürmischen Entwicklung, die diese Systeme nehmen, ist schon in naher Zukunft zu erwarten, daß die meisten Schrittmacher über eine frequenzadaptive Zusatzfunktion verfügen werden, die nach Bedarf zugeschaltet werden kann.

Es ist das Anliegen dieses Buches, die medizinischen und technischen Aspekte der frequenzadaptiven Stimulation geschlossen darzustellen. Die klinische Relevanz frequenzadaptiver Systeme sowie ihre Komplexität legten ihre Abhandlung in Form einer Monographie nahe.

Bei der Durchsicht der Literatur zu dieser Thematik fällt auf, daß einheitliche Bewertungskriterien der Parameter derzeit noch nicht existieren. Wir stellten es uns daher zur Aufgabe, mit dem Buch eine Bewertungsgrundlage zu schaffen, die auf wissenschaftlichen akzeptierten Kriterien der Regelungstechnik beruht. Dieses Bewertungsmodell wird in Kapitel 2 entwickelt, die Parameter werden danach standardisiert nach ihren dynamischen und statischen Verhalten abgehandelt und verglichen.

Die Kapitel zeigen einen einheitlichen Aufbau, eine Gesamtwertung des jeweiligen Parameters wird in einer abschließenden Diskussion durchgeführt. Die Entwicklung der frequenzadaptiven Stimulation, ihre Einordnung ins Gesamtkonzept der antibradykarden Stimulation sowie ihre Indikationen handelt das erste Kapitel ab, das die bisherigen Ergebnisse der Schrittmachertherapie hinsichtlich Prognose und Hämodynamik zusammenfaßt. Der dominierenden Rolle, die technische Aspekte bei frequenzadaptiven Systemen spielen, trägt Kapitel 3 gesondert Rechnung. In ihm werden Grundzüge der in frequenzadaptiven Schrittmachern relevanten Signalerfassung- und verarbeitung dargelegt. Das letzte Kapitel zeigt zukünftige Entwicklungsrichtungen auf.

Das Buch hätte ohne die Mitarbeit von Frau Dr. B. Frenking, Herrn Dr. Th. Koch, Herrn Dr. M. Laule und Herrn O. Lochschmidt nicht entstehen können. Herrn Dr. Laule ist insbesondere für die Erstellung der Graphiken zu danken. Unser besonderer Dank gilt Herrn Dipl. Ing. R. Heinze, der – neben dem vom ihm verfaßten Kapitel – durch seine Hilfestellung bei technischen Fragestellungen das Buch entsprechend mitgestaltet hat.

Im Januar 1990

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	V
Vorwort	VII
Antibradykarde Stimulation: Prognose, Hämodynamik, Indikationen	1
Stangl, K., A. Wirtzfeld	
1 Einleitung	2
2 Prognostische Bedeutung	6
2.1 Adams-Stokes-Syndrom, AV-Blockierungen	6
2.2 Sinusknotensyndrom	7
2.3 Bradyarrhythmie	12
3 Hämodynamik des stimulierten Herzens	14
3.1 Schrittmacherspezifische Determinanten	14
3.1.1 Frequenzadaptation	15
3.1.2 AV-Synchronität	18
3.1.3 Vorhofbeitrag	18
3.1.4 Frequenz vs Vorhofbeitrag	21
3.1.5 Retrograde atrioventrikuläre Leitung	27
3.1.6 AV-Intervall	31
4 Hämodynamik unter festfrequenter VVI-Stimulation	33
4.1 Totaler AV-Block	33
4.1.2 Akuteffekte	34
4.1.3 Langzeiteffekte	35
4.2 Sinusknotensyndrom	36
4.3 Bradyarrhythmie	36
5 Physiologische Stimulation	39
5.1 Grundlagen	39
5.2 Hämodynamik	40
5.2.1 Festfrequente AAI-Stimulation	40
5.2.2 Festfrequente sequentielle Stimulation (DVI)	43
5.2.3 Vorhofgetriggerte Stimulation (VAT, VDD, DDD)	43
5.2.3.1 Akuteffekte	44
5.2.3.2 Langzeiteffekte	47
6 Vorhofunabhängige, frequenzadaptive Stimulation	48
6.1 Grundlagen	48
6.2 Hämodynamik	49
6.2.1 Akuteffekte	49
6.2.2 Langzeiteffekte	52
7 Indikationen	53
7.1 Sinusknotensyndrom	54
7.2 Bradyarrhythmie	56
7.3 Hypersensitiver Karotissinus	57
7.4 AV-Blockierungen	57

Regeltechnische Aspekte 75
Heinze, R., K. Stangl

1	Grundbegriffe der Regelungstechnik	76
1.1	Funktionselemente des Regelkreises	77
1.2	Übertragungsfunktionen	77
1.3	Gütemaß des Regelkreises	80
1.4	Stabilität des Regelkreises	81
2	Herz-Kreislauf-System als Regelkreis	83
2.1	Grundsätze zur Herzfrequenzregelung	83
2.2	Modell zur Herzfrequenzregelung	83
3	Möglichkeiten der Frequenzanpassung	86
3.1	Sinusknoten-gesteuerte Systeme	86
3.2	ZNS/Sympathikus-geführte Systeme	86
3.3	Metabolisch geregelte Systeme	88
3.4	Aktivitätsgesteuerte Systeme	88
4	Optimalregelung	89
5	Bewertungskriterien	90

Meßtechnische Aspekte 93
Stangl, K., M. Laule

1.	Einleitung	94
2.	Meßsignalerfassung	96
2.1	Meßmethoden	96
2.2	Sensoren	96
2.3	Meßgenauigkeit	97
2.4	Zuverlässigkeit der Messung	97
2.5	Sensorstromverbrauch	99
2.6	Sensordimension	99
2.7	Intelligenter Sensor	100
3.	Signalverarbeitung	101
3.1	Vorverstärkung, Sensorsteuerung	101
3.1.1	A/D-Wandlung	103
3.2	Signalentstörung	104
3.3	Linearisierung	105
3.4	Programmierbarkeit	105

Aktivität 107
Stangl, K., H. Heuer

1	Einleitung	108
2	Meßtechnische Grundlagen	109
2.1	Piezoeffekt	109
2.2	Arbeitsweise	110

2.2.1	Activitrax™	110
2.2.2	Sensolog™	115
3.	Dynamisches Verhalten	118
3.1	Totzeiten	118
3.2	Zeitkonstanten	118
4	Statisches Verhalten	121
4.1	Funktionelle Beziehungen	121
4.2	Sensitivität	121
5	Störanfälligkeit	125
6	Diskussion	126

Atmung 131
 Stangl, K., M. Laule

1.	Einleitung	132
2.	Physiologische Grundlagen der Atemregulation	133
2.1	Blutchemische Parameter	134
2.2	Mechanoreflektorische Kontrolle	135
2.3	Unspezifische Faktoren	136
2.4	Belastungsadaption der Atmung	136
3.	Meßtechnische Grundlagen	139
3.1	Funktionsweise von Atmungsschrittmachern	141
4.	Dynamisches Verhalten	142
4.1	Totzeiten	142
4.2	Zeitkonstanten	142
5.	Statisches Verhalten	145
5.1	Funktionelle Beziehungen	145
5.1.1	Adipositas	145
5.1.2	Restriktive Ventilationsstörung	145
5.1.3	Obstruktive Ventilationsstörung	149
5.2	Sensitivität	149
6.	Diskussion	150

Druckparameter, Kontraktilitätsindizes 155
 Stangl, K., A. Wirtzfeld

1	Einleitung	156
2	Physiologische Grundlagen	157
2.1	Vorhofdruck	157
2.2	Ventrikeldruck	158
2.3	Determinanten	160
2.3.1	Flußmenge	160
2.3.2	Pumonaler Gefäßwiderstand	160

2.3.3	Postkapillärer Druck	162
3	Kontraktilitätsindizes	163
3.1	Klassifizierung	163
3.2	Druckparameter	165
3.3	Systolische Zeitintervalle	166
3.3.1	Anspannungszeit	166
3.4	Austreibungszeit	167
4	Meßtechnische Grundlagen	170
4.1	Piezoresistive Druckaufnehmer	170
4.2	Piezoelektrische Druckaufnehmer	171
5	Dynamisches Verhalten	172
5.1	Totzeiten	172
5.2	Zeitkonstanten	172
6	Statisches Verhalten	176
6.1	Funktionelle Beziehungen	176
6.2	Sensitivität	176
7	Diagnostische Möglichkeiten	177
7.1	Vorhofdruck	177
7.2	Ventrikeldruck	179
8	Diskussion	181

Gemischtvenöse Sauerstoffsättigung 187
 Stangl, K., A. Wirtzfeld

1.	Einleitung	188
2.	Physiologie der Sauerstoffbindung	189
2.1	Sauerstoffbindungskurve	189
2.2	Allosterische Effekte	189
2.3	Sauerstoffaffinität	191
2.3.1	Bohr-Effekt	191
2.3.2	2,3-Diphosphoglycerat	192
2.3.3	Temperatur	192
3.	Meßtechnische Grundlagen	194
3.1	Arbeitsweise	197
3.1.1	Oxytrax™	197
3.1.2	P55™	197
4.	Dynamisches Verhalten	200
4.1	Totzeit	200
4.2	Zeitkonstanten	201
5.	Statisches Verhalten	204
5.1	Funktionelle Beziehungen	204
5.2	Sensitivität	206
6.	Diskussion	208

Schlagvolumen	215
Stangl, K., A. Wirtzfeld	
1. Einleitung	216
2. Physiologische Grundlagen	217
2.1 Vorlast	217
2.2 Kontraktilität	218
2.3 Nachlast	220
3. Meßtechnische Grundlagen	222
3.1 Vierpolmessung	224
3.2 Zweipolmessung	224
4. Dynamisches Verhalten	226
4.1 Totzeiten	226
4.2 Zeitkonstanten	226
5. Statisches Verhalten	228
5.1 Funktionelle Beziehungen	228
5.2 Sensitivität	230
6. Diskussion	231
Zentralvenöse Bluttemperatur	237
Koch, Th., H. Heuer	
1. Einleitung	238
2. Physiologische Grundlagen	239
3. Meßtechnische Grundlagen	241
3.1 Meßwerterfassung	241
3.2 Meßwertverarbeitung	241
3.2.1 Thermos TM	241
3.2.2 Kelvin TM	242
3.2.3 Nova MR TM	242
4. Dynamik	243
4.1 Totzeiten	243
4.2 Zeitkonstanten	245
5. Statisches Verhalten	246
5.1 Funktionelle Beziehungen	246
5.2 Sensitivität	247
6. Störanfälligkeit	248
7. Diskussion	249
Der QT-Schrittmacher	255
Frenking, B., H. Heuer	
1. Physiologische Grundlagen	256
2. Geschichte der QT-Schrittmacher	257

3.	Meßwernerfassung	258
4.	Meßwertverarbeitung	259
5.	Dynamisches Verhalten	263
5.1.	Zeitkonstanten	263
6.	Statisches Verhalten	264
6.1.	Sensitivität	264
7.	Störeinflüsse	265
7.1.	Systemimmanente Störungen	265
7.2.	Störeinflüsse von außen	266
8.	Diskussion	268
	Literatur	

Parameterklassifikation, Kombinationen 273

Stangl, K., R. Heinze

1	Einleitung	274
2	Physiologische Qualitätskriterien	275
2.1	Dynamisches Verhalten	275
2.2	Sensitivität	275
2.3	Hämodynamische Rückkoppelung	275
3	Parametervergleich	276
3.1	Dynamisches Verhalten	276
3.2	Sensitivität	277
4.	Parameterklassifikation	279
4.1	Sinusfrequenz	279
4.2	Sauerstoffsättigung	279
4.3	Temperatur	279
4.4	Aktivität	280
4.5	Schlagvolumen	280
4.6	Anspannungszeit (Pre-ejection-period)	281
4.7	Stim-T-Intervall	281
4.8	Atmungsparameter	281
4.9	Rechtsatrialer Druck	282
4.10	Rechtsventrikulärer Druck	282
4.11	DP/dt	282
5.	Parameterkombinationen	283
5.1	Kombinationen mit Standardkathetern	283
5.1.1	Atmung und Schlagvolumen	284
5.1.2	Atmung und Aktivität	285
5.1.3	Stim-T-Intervall und Schlagvolumen/Aktivität	285
5.2	Kombinationen mit speziellen Sensorkathetern	285
5.2.1	Sauerstoffsättigung und Temperatur	285
5.2.2	Temperatur und Aktivität	286
5.2.3	Sauerstoffsättigung, Druck und Schlagvolumen	286

Holter-Funktionen	291
Stangl, K.	
1. Einleitung	292
2. Technische Grundlagen	293
3. Speichertypen bei Einkammerschrittmachern	294
3.1 Stimulationszähler	294
3.2 Inhibitionszähler	294
3.3 Einschaltzähler	294
3.4 Vorzeitigkeitszähler	294
3.5 Kombinierte Parameter	295
3.5.1 Prozentuale Stimulation	295
3.5.2 Prozentuale Einschalthäufigkeit	295
3.6 Histogramm	296
4. Speichertypen in Zweikammerschrittmachern	304
4.1 Diagnostische Möglichkeiten	305
5. Zukünftige Entwicklungen	310
Zukünftige Entwicklungen	311
Stangl, K., M. Laule	
1. Einleitung	312
2. Intelligenter Schrittmacher	314
2.1 Universaler Softwareschrittmacher	314
2.2 Automatisierung von Schrittmacherfunktionen	315
2.3 Automatische Meßbereichsanpassung	316
2.4 Speicherung diagnostischer Daten	317
3. Hämodynamisch selbstoptimierende Systeme	319
4. Frequenzadaptive Zweikammersysteme	320
5. Parameterkombinationen	321
5.1 Standardsystem	321
5.2 Sensorsystem	322
6. Antibradykarder und antitachykarder Schrittmacher	323
Stichwortverzeichnis	326