

Alternative Energiequellen für Herzschrittmacher

«Energy harvesting»

Konventionelle Herzschrittmacher besitzen Batterien, welche für die Stromversorgung des Gerätes zuständig sind. Diese Batterien haben eine endliche Energiespeicherkapazität, weswegen Schrittmachergeneratorwechsel aufgrund von Batterieerschöpfung häufig sind. Schrittmacher die ohne Batterie auskommen sind darum höchst erwünscht. Reoperationen und daraus entstehende Komplikationen können so vermieden werden. Der folgende Beitrag gibt einen Einblick in die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich der batterielosen Schrittmacher.



Les stimulateurs cardiaques conventionnels ont des piles qui sont responsables de l'alimentation électrique de l'appareil. Ces batteries ont une capacité de stockage d'énergie limitée, c'est pourquoi les changements de générateur de stimulateur cardiaque sont fréquents en raison de l'épuisement des batteries. Les stimulateurs cardiaques qui se passent de piles sont donc très souhaitables. Les réopérations et les complications qui en résultent peuvent ainsi être évitées. L'article suivant donne un aperçu des activités de recherche et de développement dans le domaine des stimulateurs cardiaques sans piles.

Schrittmacher und ihre Energieversorgung

Implantierbare Herzschrittmacher sind die Therapie der Wahl zur Behandlung relevanter bradykarder Herzrhythmusstörungen. Rasche technische Fortschritte führten bereits in den ersten Jahren nach der Einführung implantierbarer Herzschrittmacher 1958 zur Entwicklung der mittlerweile performanten Geräte. Diese offerieren heutzutage vielfältigste Funktionen. Kardiale Resynchronisation, multisite pacing, Heimüberwachung, Herzinsuffizienz- und ST-Strecken-Monitoring, Arrhythmie-Präventionsfunktionen und vieles andere mehr bieten dem versierten Anwender eine breite Palette an Möglichkeiten um auf patientenspezifische Bedürfnisse eingehen zu können. Diese Funktionalitäten erhöhen leider den Energiebedarf der Geräte – teils nur unwesentlich, teils deutlich.

Obschon die Batterietechnologie seit den Anfängen der Herzschrittmachertherapie massive Fortschritte gemacht hat, sind erschöpfte Batterien klinisch das häufigste Problem bei Herzschrittmacherpatienten. 2017 wurden in der Schweiz etwas mehr als 6800 Herzschrittmacher implantiert (Zahlen der Arbeitsgruppe Herzschrittmacher und Elektrophysiologie der Schweizerischen Gesellschaft für Kardiologie). 23% davon waren keine Neuimplantationen, sondern lediglich Generatorwechsel, meist aufgrund erschöpfter Batterien. Damit steht die Schweiz nicht alleine da, die Rate an Schrittmacherimplantationen und speziell Generatorwechseln ist europaweit ähnlich und weiter im Steigen begriffen (1).

Von Entwicklerseite wurden Anstrengungen unternommen, die Batterie- und Gerätelebensdauer zu steigern. Beispielsweise hatten vor



Maximilien Tholl
Bern



Dr. Adrian
Zurbuchen
Bern



Dr. med. Dr. phil.
Andreas Häberlin
Bern

einigen Jahrzehnten sog. thermonukleare Schrittmacher – betrieben durch die Zerfallswärme von Plutonium 238 – eine gewisse Verbreitung gefunden und brillierten mit hoher Lebensdauer (2). Damit einhergehende sicherheitstechnische und ökologische Bedenken haben verständlicherweise dazu geführt, dass dieser Ansatz aufgegeben worden ist. Schrittmacher die von aussen durch die Haut aufgeladen werden sind wiederum aus Gründen der Patientensicherheit problematisch. Es kann nicht jedem Patienten zugemutet werden, ans regelmässige «Auftanken» des Schrittmachers zu denken.

«Energy harvesting» – oder wie könnte auf Batterien verzichtet werden?

Der Grundgedanke komplett batterieloser Geräte liegt darin, dass die für den Gerätebetrieb notwendige Energie nicht bei der Geräteimplantation mitimplantiert wird, sondern während des laufenden Betriebs gewonnen wird. Damit befasst sich das sog. «energy harvesting». Glücklicherweise ist die Leistungsaufnahme von Schrittmachern extrem klein (im Bereich einiger μW). Mit verschiedenen Ansätzen kann daher versucht werden, dem Körper irgendwo ein kleines Quäntchen Energie abzugewinnen. Nachfolgend präsentieren wir einige Ansätze, die in der Forschung verfolgt werden um batterielose Herzschrittmacher zu entwickeln.

Solarbetriebene Herzschrittmacher

Subkutane Solarzellen ermöglichen Energiegewinnung im Körper. Sonnenlicht könnte demzufolge als Energiequelle für Schrittmacher verwendet werden. Das Prinzip wurde bereits mehrfach beschrieben und getestet (3-5) und beruht auf der Umwandlung der geringen Lichtmenge im subkutanen Gewebe in elektrische Energie. Die Haut scheint eigentlich undurchsichtig zu sein, dies relativiert sich aber durch folgendes Experiment: hält man sich eine starke Taschenlampe vor die Hand, kann ein Teil des Lichtes auf der anderen Seite beobachtet werden. Insbesondere im nahen Infrarotbereich ist menschliches Gewebe erstaunlich transparent. Bashkatov et al. (6) haben die Transmission von Licht in menschlicher Haut gemessen. Die Messungen ergeben eine Transmission von 26.5% übertragener Lichtenergie (Wellenlängen 400 – 2000 nm) in einer Implantationstiefe von 2 mm. Mit der von Wettermessstati-

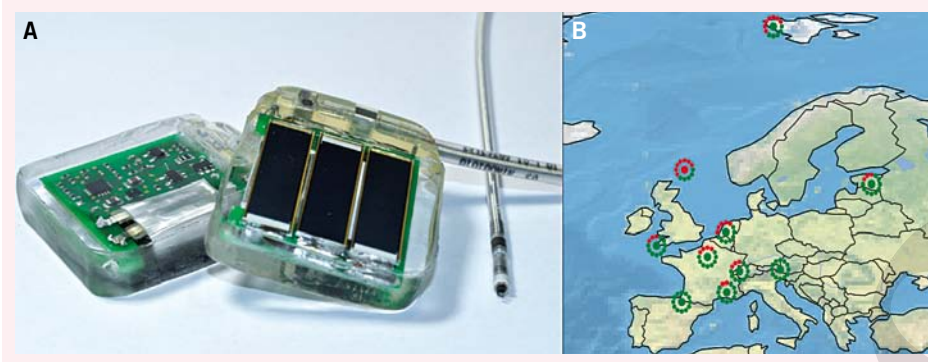


Abb. 1: A: Solar-Schrittmacher. Dieser besitzt ein transparentes Gehäuse, sowie 3.6 cm² Solarzellenfläche zur Energiegewinnung (7). Eine kommerziell erhältliche Schrittmacherelektrode kann angeschlossen werden.
B: Abschätzung der zu erwartenden Ausgangsleistung in Europa. Die Landkarte zeigt mittels Punkten, ob die Durchschnittsleistung der Solarzelle 2015 ausgereicht hätte (grün), um den typischen Energiebedarf eines Herzschrittmachers zu decken (grosser zentraler Punkt). Die kleinen Punkte um den zentralen Punkt zeigen, ob die monatliche Durchschnittsleistung ausgereicht hätte um während dieses Monats den Herzschrittmacher zu versorgen. Auf 12 Uhr befindet sich Januar und im Uhrzeigersinn werden alle Monate abgebildet.

onen bekannten Sonneneinstrahlung und Lichttransmission der Haut kann damit die Ausgangsleistung einer subkutanen Solarzelle abgeschätzt werden. In (Abb. 1) (rechts) ist die Auswertung der abgeschätzten Durchschnittsleistung der subkutanen Solarzellen in Europa abgebildet. Es wurde angenommen, dass sich eine Testperson von Montag bis Freitag jeweils 10 min am Mittag und zu Tagesrandzeiten der Sonne aussetzt und eine nur 3.6 cm² grosse Solarzelle 2 mm unter der sonnenexponierten Haut implantiert hat. Der grosse zentrale Punkt zeigt, ob die Durchschnittsleistung der Solarzelle im ganzen Jahr 2015 ausgereicht hätte, um den typischen Energiebedarf eines Herzschrittmachers zu decken (falls Punkt grün). Die kleinen Punkte um den zentralen Punkt zeigen, ob die monatliche Durchschnittsleistung ausgereicht hätte um den Herzschrittmacher zu versorgen. Die Grafik zeigt, dass bis auf in Nordschottland überall genug Energie hätte gewonnen werden können. Das einfache Prinzip des solarbetriebenen Herzschrittmachers wurde in Prototypenform bereits umgesetzt (7) und erfolgreich im Labor und im lebenden Organismus getestet. Zudem untersuchten Bereuter et al. (8) in einer Langzeituntersuchung, wie viel Energie von subkutanen Solarzellen im Alltag von 32 in der Schweiz lebenden Personen gewonnen werden kann. Die Langzeitstudie zeigt vielversprechende Ergebnisse bezüglich der Umsetzbarkeit des unkonventionellen Konzepts eines solarbetriebenen Herzschrittmachers.

Bewegungsbasierte Energiegewinnung im Herzen

Eine weitere zuverlässige und performante Energiequelle stellt das menschliche Herz selbst dar. Um den Körper zu durchbluten wendet das Herz durchschnittlich rund 1 Watt an hydraulischer Energie auf – so viel wie ein heutiges Mobiltelefon durchschnittlich konsumiert. Moderne Herzschrittmacher benötigen gerade mal einige Mikrowatt. Ein weiterer Ansatz macht sich darum ein automatisches Uhrwerk zu Nutze, welches – ähnlich wie am Handgelenk einer Person – die Bewegung des Herzmuskels in elektrische Ener-



Abb. 2: Epikardialer batterieloser Herzschrittmacher in linksventrikulärer apikaler Position. Dieser Prototyp beinhaltet ein für diese Zwecke angepasstes Uhrwerk. Die Schwungmasse wurde optimiert um möglichst viel der mechanischen Herzbewegung in elektrische Energie umzusetzen. Die Energie wird von der Elektronik (grünes Bauteil) verarbeitet um das Herz mit Schrittmacherimpulsen zu stimulieren. Ein Magnet (goldfarben, links am Rand des Prototyps) wird in diesem Versuch verwendet um den Schrittmacher während der Implantation zu inhibieren.

gie umwandelt (9). Das Gerät wird epikardial auf den linken Ventrikel angebracht und erfährt somit starke Beschleunigungen (Abb. 2). Eine Schwungmasse im Innern des Geräts beginnt dadurch zu oszillieren und treibt damit einen elektrischen Generator an. Die so generierte elektrische Energie wird kurzzeitig zwischengespeichert um eine Schrittmacherelektronik immer mit genügend Energie versorgen zu können. Dank der unmittelbaren Nähe zum Herzen und der kontinuierlichen Bewegung sind weder lange Schrittmacherkabel noch eine grosser Zwischenspeicher nötig (10-12). Sollte dennoch ein medizinisches Problem (Abnahme der Ventrikelkontraktilität) oder ein technischer Mangel vorliegen, könnte dies zu Energieeinsparungen führen. Um eine Unterversorgung des Schrittmachers abzuwenden wird ein Zwischenspeicher als Energiereserve eingesetzt, der es dem Patienten ermöglicht einen Spezialisten rechtzeitig aufzusuchen. Damit hätte ein solches Gerät das Potenzial, eine lebenslange Energiequelle eines Herzschrittmachers zu sein. Das beschriebene Grundprinzip wird derzeit weiter verfeinert um Verträglichkeit und Implantationsart des Geräts weiter zu verbessern.

Ein wichtiger Beitrag dazu leistet ein anderes Energiegewinnungskonzept welches eine Implantation im rechten Ventrikel (und nicht epikardial) vorsieht. Das Gerät gleicht in Form und Grösse einem modernen kabellosen Einkammer-Schrittmacher und kann mittels Katheter in einem minimalinvasivem Routineeingriff endokardial implantiert werden (Abb. 3). Endokardial fest verankert wird auch dieses Gerät den Beschleunigungen des Herzens ausgesetzt. Im Innern des Geräts befindet sich ein Magnetstapel, der zwischen zwei Spiralfedern aufgehängt ist und von der Myokardbewegung in Schwingung gerät. Die Bewegung des Magnetstapels induziert Strom in den darum liegenden Kupferspulen. Eine Studie dazu hat gezeigt, dass dieses Gerät bei vielen getesteten Herzbewegungen genügend Energie gewinnen könnte (13). Die Effizienz dieses Prinzips müsste aber noch weiter gesteigert werden um auch bei Herzen mit «ungünstigen Bewegungen» (z.B. grossen nicht kontraktile Bereiche nach Myokardinfarkten) noch genügend Energie liefern zu können. Allerdings wurde das System mit einem mathematischen Modell optimiert und somit ist unter gleichbleibenden Rahmenbedingungen für dieses Prinzip nur eine kleine Effizienzsteigerung denkbar. Eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung ist die Frequenzkonvertierung, wobei eine tiefe Frequenz (z.B. die Herzfrequenz) in eine höhere Frequenz umgewandelt wird. Diese Art der Effizienzoptimierung bewährte sich schon im Prinzip des Uhrwerks. Ein Ansatz der die Frequenzkonvertierung und die endokardiale Energiegewinnung kombiniert wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

Blutflussbasierte Energiegewinnung im Herzen

Eine der grossen Herausforderungen von bewegungs- oder vibrationsbasierten Energiegeneratoren ist die Nutzung der tiefen Herzfrequenz (1 Hz bei einem Puls von 60 / min). Viele elektromagnetische Generatoren benötigen möglichst hohe Beschleunigungen um effi-

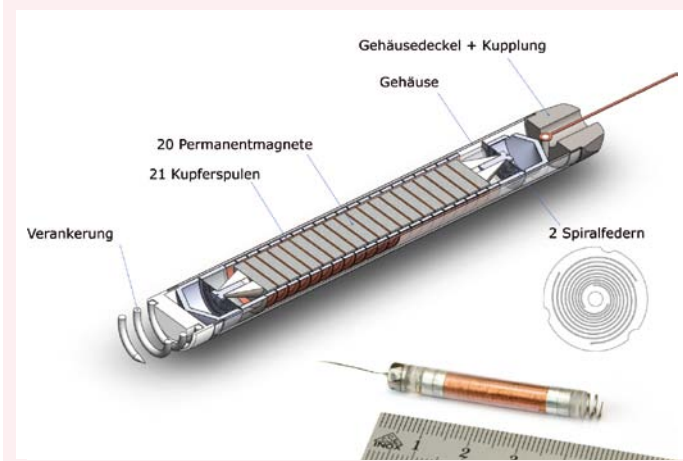


Abb. 3: Die Illustration des endokardialen Energiegewinnungsgerätes im Querschnitt verdeutlicht das angewendete magnetisch-induktive Konzept. Die 20 Permanentmagnete sind zu einem Stapel zusammengefasst und oszillieren zwischen den zwei Spiralfedern durch 21 Kupferspulen in welchen der gewünschte Strom induziert wird. Das Bild rechts unten zeigt den fertigen Prototypen.

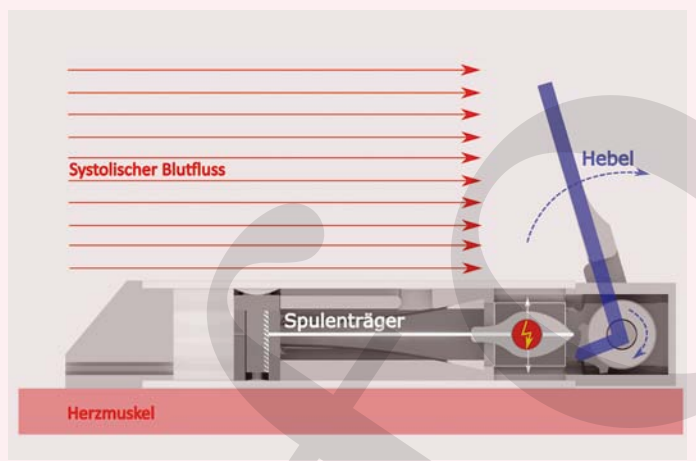


Abb. 4: Funktionsprinzip des Blutflussgenerators. Der Spulenträger (weiss) trägt die Spule (rot) und wird durch den Hebel (blau) ausgelenkt und in freie Vibration gebracht. Der Hebel seinerseits wird ausgelenkt durch den systolischen Blutfluss und während der Diastole durch eine Feder zurückgestellt.

zient zu funktionieren. Daher wird untersucht wie die vergleichsweise niedrigen Beschleunigungen und tiefen Frequenzen des Herzens in höhere umgewandelt werden können (14). Ein Ansatz für die Umwandlung ist in (Abb.4) gezeigt. Der Generator basiert auf dem elektromagnetischen Energieumwandlungsprinzip. Ein einseitig fixierter Spulenträger wird am nicht-fixierten Ende durch einen Hebelarm ausgelenkt und anschliessend schlagartig in eine hochfrequente freie Vibration entlassen (15). Der Hebelarm wird durch den niederfrequenten Blutfluss ausgelenkt. Die freie Vibration des Trägers hat eine um Faktor 100 höhere Frequenz als die native Herzfrequenz. Diese Frequenzkonversion erlaubt eine effiziente Energieumwandlung und die Generierung von genügend nutzbarer Energie um einen Herzschrittmacher betreiben zu können.

Vergleich der Methoden und Zukunftsausblick

Die oben präsentierten unterschiedlichen Ansätze zur Energiegewinnung im menschlichen Körper weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. Um beispielsweise die Batterien konventioneller Herzschrittmacher zu ersetzen, scheint ein solarbasiertes Verfahren möglich, Robustheit und Langlebigkeit von Solarzellen sind bekanntermassen gut. Allerdings müsste eine Implantation ehestens im Sonnenlichtexponierten Halsbereich stattfinden, was dort wiederum störend empfunden werden könnte. Die modernen kabellosen Herzschrittmacher könnten wiederum gut von endokardialen «energy harvestern» profitieren. Die kabellosen Schrittmacher werden direkt in den rechten Ventrikel implantiert, werden dort über die Zeit eingekapselt und können danach nicht mehr einfach entfernt werden. Eine erschöpfte Batterie hat zur Folge, dass ein weiteres Gerät implantiert werden muss und das alte als «Elektroniksrott» im Herzen ver-

bleibt. Ein endokardialer «energy harvester» im selben Gehäuse wie die Schrittmacherelektronik wäre eine vielversprechende Alternative zu Batterien und könnte einem solchen Schrittmacher eine längere Lebensdauer verleihen.

Nebst den in dieser Arbeit erwähnten technischen Lösungsansätzen wird auch an «biologischen Herzschrittmachern» geforscht (16). Beispielsweise könnte biologisch mittels Gentransfer die Expressierung exzitatorischer Ionenkanäle gesteigert werden. Auch mögliche künftige Fortschritte in der Batterieetechnologie stehen in Konkurrenz zu den Ansätzen des «energy harvestings». Inwieweit sich die Energiegewinnung im Körper in Zukunft durchsetzen kann, hängt von vielen weiteren Faktoren ab (17). Dem Wunsch nach längerer Lebensdauer der Geräte seitens Patienten und Ärzteschaft könnte damit aber entsprochen werden.

Maximilien Tholl, MSc^{1,2}

Dr. Adrian Zurbuchen³

Dr. med. Dr. phil. Andreas Häberlin^{1,2}

¹ Universitätsklinik für Kardiologie, Inselspital 3010 Bern, Universität Bern

² ARTORG Center for Biomedical Engineering Research, 3010 Bern

³ Sitem-Insel AG, 3010 Bern, Universität Bern

andres.haerberlin@artorg.unibe.ch

Interessenskonflikt: Die Autoren deklarieren keine Interessenskonflikte im Zusammenhang mit diesem Artikel.

Diese Arbeit wurde unterstützt von der Velux-Stiftung.

Literatur am Online-Beitrag unter: www.medinfo-verlag.ch

Take-Home Message

- ◆ Häufigster Grund eines Schrittmacherwechsels ist eine erschöpfte Batteriekapazität.
- ◆ Batterielose Herzschrittmacher – betrieben durch einen «energy harvesting»-Mechanismus könnten die Anzahl dieser ungeliebten (potenziell komplikationsträchtiger) Eingriffe senken.
- ◆ Nutzbare Energiequellen sind externe Energielieferanten wie das Sonnenlicht, die Herzbewegung oder der Blutfluss.
- ◆ Eine endokardiale Energiegewinnung ist speziell attraktiv, da sie für die neuartigen kabellosen Herzschrittmacher geeignet ist.

Messages à retenir

- ◆ La raison la plus fréquente d'un changement de stimulateur cardiaque est l'épuisement de la capacité de la batterie.
- ◆ Les stimulateurs cardiaques sans piles - alimentés par un mécanisme de récupération d'énergie - pourraient réduire le nombre de ces interventions impopulaires (truffé de complications)
- ◆ Les sources d'énergie utilisables sont des sources d'énergie externes telles que la lumière du soleil, les mouvements du cœur ou le flux sanguin.
- ◆ La production d'énergie endocardique est particulièrement intéressante car elle convient aux nouveaux stimulateurs cardiaques sans fil.

Literatur

1. Raatikainen, M.J.P., et al., A Decade of Information on the Use of Cardiac Implantable Electronic Devices and Interventional Electrophysiological Procedures in the European Society of Cardiology Countries: 2017 Report from the European Heart Rhythm Association. *Europace*, 2017. 19(suppl_2): p. ii1-ii90.
2. Parsonnet, V., et al., Thirty-one years of clinical experience with "nuclear-powered" pacemakers. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2006. 29(2): p. 195-200.
3. Song, K., et al., Subdermal Flexible Solar Cell Arrays for Powering Medical Electronic Implants. *Adv Healthc Mater*, 2016. 5(13): p. 1572-80.
4. Song, K., et al., Generation of electrical power under human skin by subdermal solar cell arrays for implantable bioelectronic devices. *Biosens Bioelectron*, 2017. 92: p. 364-371.
5. Haerberlin, A., et al., Successful pacing using a batteryless sunlight-powered pacemaker. *Europace*, 2014. 16(10): p. 1534-1539.
6. Bashkatov, A.N., et al., Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000nm. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005. 38(15): p. 2543.
7. Haerberlin, A., et al., The first batteryless, solar-powered cardiac pacemaker. *Heart Rhythm*, 2015. 12(6): p. 1317-23.
8. Bereuter, L., et al., Energy Harvesting by Subcutaneous Solar Cells: A Long-Term Study on Achievable Energy Output. *Ann Biomed Eng*, 2017. 45(5): p. 1172-1180.
9. Goto, H., et al., Feasibility of using the automatic generating system for quartz watches as a leadless pacemaker power source. *Med Biol Eng Comput*, 1999. 37(3): p. 377-80.
10. Zurbuchen, A., et al., The Swiss approach for a heartbeat-driven lead- and batteryless pacemaker. *Heart Rhythm*, 2017. 14(2): p. 294-299.
11. Zurbuchen, A., et al., Towards Batteryless Cardiac Implantable Electronic Devices-The Swiss Way. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2017. 11(1): p. 78-86.
12. Zurbuchen, A., et al., Energy harvesting from the beating heart by a mass imbalance oscillation generator. *Ann Biomed Eng*, 2013. 41(1): p. 131-41.
13. Zurbuchen, A., et al., Endocardial Energy Harvesting by Electromagnetic Induction. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2018. 65(2): p. 424-430.
14. Kulah, H. and K. Najafi, Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications. *IEEE Sensors Journal*, 2008. 8(3): p. 261-268.
15. Tholl, M.V., et al., An Intracardiac Flow Based Electromagnetic Energy Harvesting Mechanism for Cardiac Pacing. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2018.
16. Chauveau, S., P.R. Brink, and I.S. Cohen, Stem Cell Based Biological Pacemakers From Proof of Principle to Therapy: a Review. *Cytotherapy*, 2014. 16(7): p. 873-880.
17. Haerberlin, A., et al., [Future cardiac pacemakers - technical visions]. *Ther Umsch*, 2015. 72(8): p. 529-35.