

# Kontinuierliche nicht-invasive Blutdruckmessung mittels Pulswellenlaufzeit

## Für welche Anwendungsgebiete ist sie attraktiv?

Andreas Patzak

Institut für Vegetative Physiologie, Charité-Universitätsmedizin Berlin, Deutschland

**Die Blutdruckmessung im Schlaf hat Bedeutung für die Diagnose und Behandlung der arteriellen Hypertonie. Insbesondere aber die kontinuierliche Erfassung des Blutdrucks (BD) wird für die Untersuchung schlafbezogener transien-ter Blutdruckänderungen immer wichtiger. Die vorliegende Schrift stellt eine Methode der nicht-invasiven kontinuierlichen und indirekten Bestimmung des arteriellen Blutdrucks vor, die auf der Messung der Pulswellenlaufzeit beruht. Validierungsstudien, bei denen diese Methode mit der intraarteriellen Messung (Goldstandard) sowie Manschettentech- niken verglichen wurde, zeigen klinisch akzeptable Differenzen. Kontinuierliche Messung und Rückwirkungsfreiheit machen die Bestimmung des Blutdrucks mittels Pulswellenlaufzeit in der Schlafmedizin, aber auch für andere Anwendungen attraktiv.**

Schlafmedizin und -forschung gehören zu den sich am schnellsten entwickelnden Gebieten der Medizin. Die Schlafapnoe, eine der am häufigsten vorkommenden Schlafstörungen, hat eine hohe Prävalenz in der Altersgruppe über 45 Jahre. Sie ist ein unabhängiger Risikofaktor für arterielle Hypertonie, Herzrhythmusstörungen, plötzlichen Herztod und Schlaganfall [1]. Ereignisse wie Apnoen, periodische Bewegungen der Extremitäten und andere Störungen des Schlafes, die mit einer Aufwachreaktion einhergehen, werden von Blutdruckanstiegen begleitet (Abb. 1). Diese erhöhen unter anderem die Nachlast des Herzens, sind aber sehr wahrscheinlich auch mit der Entstehung einer Hypertonie verbunden [2]. Der Messung der nächtlichen Blutdruckwerte sowie der Aufklärung der Pathomechanismen, die der Hypertonieentstehung zugrunde liegen, kommt große Bedeutung zu. Allerdings sind traditionelle Manschetten-basierte Verfahren der Blutdruckmessung nicht geeignet, transiente Blutdruckveränderungen zu erfassen, da sie diskontinuierlich mit geringen Abtastfrequenzen arbeiten (24-h-Blutdruckmessung) und zudem nicht rückwirkungsfrei sind. Vegetative Reaktionen während des Aufpumpvorgangs der Manschette im Schlaf können sowohl zu falsch positiven also auch zu falsch negativen Messwerten führen.

Alternative, kontinuierlich messende, nicht-invasive Verfahren der Blutdruckmessung beruhen

auf der Methode der entspannten Membran nach Peñáz sowie der Bestimmung mittels Pulswellenlaufzeit. Erstere ist eine Technik, die mit Fingermanschetten arbeitet, den Druckverlauf hochauflösend darstellt und in Geräten wie Finapres® oder Portapres® in die Praxis umgesetzt wurde. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht unter anderem in der Notwendigkeit der Rekalibrierung bei orthostatischen Druckänderungen, die mit Unterbrechungen der Messung einhergehen. Die Blutdruckbestimmung mittels Pulswellenlaufzeit ist erst seit kurzem in kommerziellen Geräten der Schlafdiagnostik implementiert (z. B. SomnoScreen™ plus oder SOMNOtouch™ NIBP).

### Kontinuierliche und nicht-invasive Bestimmung des Blutdrucks mittels Pulswellenlaufzeit

Die Pulswellenlaufzeit ist die Zeitspanne, die ein Puls für die Überwindung einer bestimmten Strecke innerhalb eines Herzzyklus braucht. Die Pulswellengeschwindigkeit ist eine Funktion von Gefäßsteifigkeit (Elastizitätsmodul), Gefäßdurchmesser und Gefäßwanddicke. Die physikalischen Grundlagen dieser Beziehung wurden zuerst durch Moens und Kortewig beschrieben und finden in der Gleichung  $PWG = \sqrt{Eh/\rho D}$  ihren Ausdruck. Dabei ist PWG die Pulswellengeschwindigkeit, E der Elastizitätsmodul, der die Gefäßsteifigkeit beschreibt, h die Wanddicke,  $\rho$  ist die Dichte des Blutes und D der Gefäßdurchmesser. Praktisch ergibt sich daraus, dass die Pulswellengeschwindigkeit hauptsächlich durch die elastischen Eigenschaften der Gefäßwand sowie den Blutdruck bestimmt wird (Abb. 2).

Kardiovaskuläre Risikofaktoren, Alter und Geschlecht korrelieren mit der Pulswellengeschwindigkeit [3, 4]. Die Pulswellengeschwindigkeit ändert sich systematisch bei Ereignissen, wie zum Beispiel obstruktiven Apnoen, die mit Änderungen des Blutdruckes einhergehen [5]. Damit sind Voraussetzungen für eine Verwen-

derung der Pulslaufzeit bzw. Pulswellengeschwindigkeit für die Bestimmung des arteriellen Blutdruckes gegeben.

### Notwendigkeit der Kalibrierung der Messung

Die Bestimmung des absoluten Blutdruckes aus der Pulswellengeschwindigkeit ist möglich, wenn die individuellen, nicht-blutdruckbedingten Gefäßwandeigenschaften berücksichtigt werden (individuelle Angleichung der Funktion zwischen Blutdruck und Pulswellengeschwindigkeit). Dies kann durch die Messung der individuellen Blutdruck-Pulswellengeschwindigkeit-Beziehung bei gleichzeitiger Blutdruckerfassung unter Verwendung einer herkömmlichen Methode erreicht werden. Die Bestimmung der kompletten Funktion ist jedoch aufwändig und unter klinischen Bedingungen nicht praktikabel. Alternativ wurde eine einfach durchführbare Ein-Punkt-Kalibrierung vorgeschlagen und mit gutem Erfolg getestet [6].

### Technische Aspekte der Messung der Pulswellengeschwindigkeit

#### Ableitorte der physiologischen Signale

Ableitorte und Signale haben Einfluss auf die Interpretation der Messergebnisse. Die Pulswelle wird durch die mechanische Aktion des linken Ventrikels ausgelöst. Alle Verfahren, welche die mechanischen bzw. hämodynamischen Phänomene der Pulswelle erfassen, sind am besten für die Messung der Pulswellengeschwindigkeit geeignet. Häufig wird jedoch die R-Zacke des EKGs in Kombination mit der Ankunft der peripheren Pulswelle am Finger (Fingerplethysmografie) genutzt. Teilweise verwendet man die Kardiophonografie in Kombination mit der peripheren Pulswelle mit dem Vorteil, dass die Präejektionszeit als potenzieller Störfaktor entfällt. Die Pulswellengeschwindigkeitsmessung im Dienste der Blutdruckbestimmung kann prinzipiell an beliebigen Gefäßabschnitten erfolgen. Berechnet man sie aus dem Zeitversatz von der R-Zacke des EKGs bzw. Phonokardiogramms und dem Erscheinen in der Peripherie, werden sowohl zentrale als auch periphere Gefäßabschnitte mit unterschiedlichem Wandaufbau und damit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften einbezogen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Pulswellengeschwindigkeit-Blutdruck-Beziehungen, die sich in geräteinternen Funktionskurven wiederfinden.

#### Einfluss der Präejektionszeit

Die Verwendung der R-Zacke des EKGs als Startpunkt der Pulswelle schließt die Präejektionszeit bei der Pulswellengeschwindigkeitsmessung mit ein. Diese wird durch verschiedene Faktoren, insbesondere durch den sympathischen Aktivierungszustand der Ventrikel und kardiovaskuläre

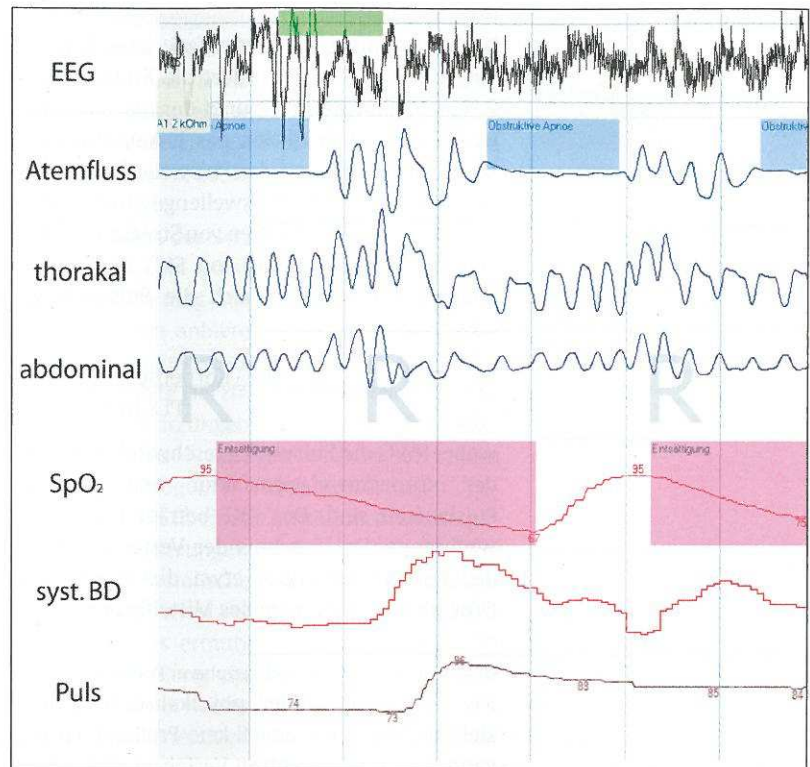


Abb. 1 Originalregistrierung von Elektroenzephalogramm (EEG), nasalem Atemfluss, thorakalen (thorakal) und abdominalen Atembewegungen (abdominal), Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>), systolischem Blutdruck mittels Pulswellenlaufzeit bestimmt (syst. BD) und Herzfrequenz (Puls) bei einem Patienten mit obstruktiven Apnoen (gekennzeichnet mit blauem Querstreifen, SomnoScreen™). Die Aufwachreaktion (grün im EEG gekennzeichnet) geht mit dem Wiedereinsetzen der Atmung (siehe Atemfluss) einher. Herzfrequenz- und Blutdruck steigen an. Die Sauerstoffsättigung fällt mit einer zeitlichen Verzögerung entsprechend der Kreislaufzeit ab (pinkfarbene Querstreifen).

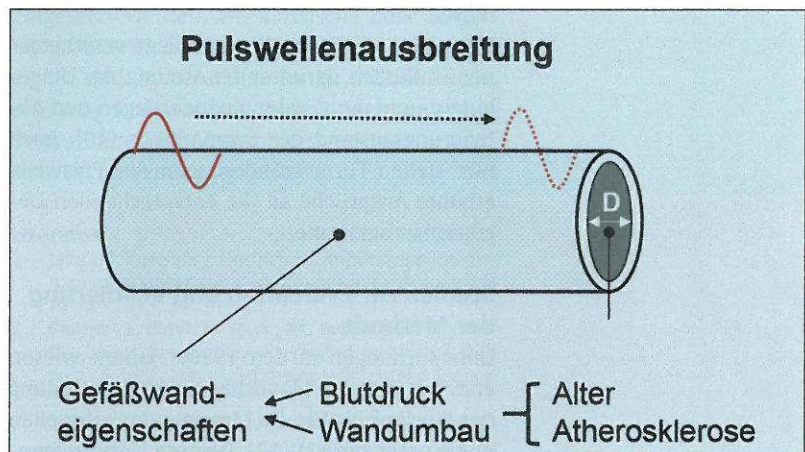


Abb. 2 Die Pulswellengeschwindigkeit wird im Wesentlichen von der Steifigkeit der Gefäße, dem Gefäßdurchmesser (D) und der Gefäßwanddicke bestimmt. Modulatoren dieser Größen sind Atherosklerose, Gefäßwandumbau anderer Art, Blutdruck und Alter.

Wirkstoffe beeinflusst. Sie korreliert negativ mit der Herzfrequenz [7]. Studien zeigten, dass die Pulslaufzeit signifikant durch die Präejektionszeit moduliert wird, und unter Umständen – z.B. bei bestimmten medikamentösen Therapien – die Blutdruckbestimmung mittels Pulslaufzeit beeinträchtigen kann [8].

**Praktisches Vorgehen**

Die Bestimmung der Pulslaufzeit bzw. Pulswellengeschwindigkeit erfordert die Erfassung von 2 Signalen, die den Zeitpunkt der mechanischen bzw. elektrischen Aktion des linken Ventrikels sowie das Erscheinen der Pulswelle in der Peripherie anzeigen. Die Pulswellengeschwindigkeit entspricht dem Quotienten von Strecke und Zeitbedarf. Bei Verwendung von EKG und Fingerplethysmografie ergibt sich die Pulswellengeschwindigkeit aus

$$\text{PWG [cm/ms]} = \frac{\text{KKF} \cdot \text{Körperhöhe [cm]}}{\text{PLZ [ms]}}$$

wobei PWG die Pulswellengeschwindigkeit, KKF der Körperkorrelationsfaktor und PLZ die Pulslaufzeit sind. Der KKF beträgt 0,5 bei Erwachsenen. Das Ergebnis der Verrechnung mit der Körperhöhe ergibt etwa die Strecke von Drosselgrube zur Spitze des Mittelfingers [9].

**Detektion von R-Zacke und peripherer Pulswelle**

Die Erkennung beider physikalischer Größen stellt technisch prinzipiell kein Problem dar und kann mit verschiedensten Verfahren mit ausreichender Genauigkeit gewährleistet werden. Voraussetzung sind gute Signalqualität, ausreichende Abtastrate und Breite der Digitalisierung. Jedoch können Störungen technischer Art (schlechter Elektrodensitz) und EKG-Veränderungen bei Herzerkrankungen potenziell zu Detektionsschwierigkeiten bzw. zu fehlerhafter Bestimmung von Laufzeit und damit Blutdruck führen.

Die periphere Pulswelle unterliegt verschiedenen Einflüssen, darunter der Atmung, der Umgebungstemperatur, Volumenänderungen und Aktivierungszustand des Sympathikus [10]. Auch hier stellen Formveränderungen der Pulswelle erhöhte Ansprüche an die entsprechenden Detektionsprogramme.

**Studien zur Evaluation und Validierung der Methode**

Untersuchungen in den 1980er Jahren wiesen erstmals auf die Möglichkeit der Verwendung der Pulslaufzeit für die Messung des arteriellen Blutdruckes hin [11, 12]. Weitere Untersuchungen erfolgten mit dem Ziel, die Methode hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die kontinuierliche nicht-invasive Blutdruckmessung zu evaluieren.

**Validierung pulszeitbasierter Messung mittels invasiver Blutdruckmessung**

Hinsichtlich der Bewertung des Messverfahrens ist die invasive Blutdruckmessung der Goldstandard. Die am Menschen durchgeführten Validierungsstudien zeigen kein ganz einheitliches Bild. Untersuchungen an Erwachsenen in endotrache-

aler Anästhesie sowie schwer erkrankten Kindern ergaben niedrige Korrelationen der Blutdruckwerte beider Methoden. Die Bland-Altman-Darstellung zeigte nicht akzeptable Übereinstimmungsgrenzen. Bei einzelnen Patienten waren Korrelationen schwach und die Autoren schlussfolgerten, dass die pulszeitbasierte Methode nicht für die Blutdruckmessung geeignet sei [13, 14]. Die Ergebnisse weisen auf die Notwendigkeit der individuellen Kalibrierung des Maßsystems hin. Eine weitere Studie zeigte, dass vasoaktive Substanzen respektive Herz-Kreislauf-Medikamente die Präejektionszeit signifikant verändern. Die Verwendung der R-Zacke des EKGs für die Laufzeitbestimmung wurde von den Autoren als sehr kritisch angesehen [8]. Eine Reihe von Studien dagegen fand gute Korrelationen und Übereinstimmungsgrenzen beim Methodenvergleich. Bei Verwendung eines Ultraschall-Doppler-Systems zur Laufzeitmessung wurde gezeigt, dass die Schlag-zu-Schlag-Messung der Pulswellengeschwindigkeit den arteriellen Blutdruck kontinuierlich und zuverlässig abbildet und insbesondere in der Lage ist, schnelle Blutdruckänderungen zu verfolgen [15]. Neuere Studien unterstützen diese Ergebnisse. Normotensive Patienten mit kardialen Arrhythmien wiesen gute Korrelationen und Übereinstimmungsgrenzen für systolische Blutdrücke zwischen blutiger und pulszeitbasierter Bestimmung auf. Bei hypotensiven Patienten waren die Methodendifferenzen größer, die Korrelation jedoch ebenfalls signifikant [16]. Die Ergebnisse sind bemerkenswert, da sie zeigen, dass Herzrhythmusstörungen, welche die Laufzeitbestimmung potentiell stören können, bei diesen Patienten zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung der Messung führten. Gute Korrelationen der systolischen Werte und akzeptable Übereinstimmungsgrenzen fanden sich in einer Untersuchung, bei der der Blutdruck durch Dobutaminapplikation erhöht wurde [17]. Diese beiden zuletzt aufgeführten Studien verwendeten ein Messsystem mit integrierter Ein-Punkt-Kalibrierung.

**Pulszeitbasierte Messung im Vergleich zur manschettenbasierten Messung**

Bei der Analyse dieser Validierungsstudien zeichnet sich ein ähnliches Bild wie beim Vergleich mit intraarteriellen Messungen ab. Frühe Untersuchungen haben weniger positive Ergebnisse. So wurden bei Validierung gegen die manschettenbasierte Messung nach Peñáz (Fingermanschette) nur schwache Korrelationen, insbesondere bei Belastungstests, gesehen [18]. Dagegen zeigte die Messung der Laufzeit in einer Studie, bei der die Präejektionszeit methodisch ausgeschlossen wurde, sehr gute Korrelationen für den systolischen Blutdruck [19]. Letztere Be-

funde werden von einer Reihe anderer Untersuchungen unterstützt, bei denen die R-Zacke und die periphere Pulswelle für die Berechnung der Pulslaufzeit verwendet wurden, das heißt die Präejektionszeit mit eingeschlossen war: Die Änderungen des Referenzblutdruckes und die Pulslaufzeit korrelierten gut, und auch die Genauigkeit der laufzeitbasierten Messung wurde in Studien bei Probanden mit körperlicher Aktivität gut bewertet [20, 21]. Die Reproduzierbarkeit der laufzeitbasierten Blutdruckbestimmung war in einer weiteren Studie ebenfalls zufriedenstellend [22].

In jüngster Zeit finden sich mehrere Publikationen zur Methodenvalidierung, bei denen eine Ein-Punkt-Kalibrierung zum Einsatz kam. Sie alle zeigen gute Korrelationen und Übereinstimmungsgrenzen zwischen systolischem Blutdruck manschettensbasierter und laufzeitbasierter Messungen. Bei gesunden Probanden (Referenz: Riva-Rocci) als auch bei Patienten mit Schlafapnoe (Referenz: Peñáz-Verfahren) wurden signifikante Korrelationen und akzeptable Übereinstimmungsgrenzen gesehen [6, 23]. In beiden Studien gab es praktisch keine Unterschiede in den Mittelwerten der gemessenen systolischen Blutdrücke. Das trifft auch für Vergleiche mit der manschettensbasierten Messung bei Patienten mit kontinuierlicher positiver Überdruckbeatmung [24] und nicht-invasiv beatmeten Patienten mit Herzinsuffizienz sowie Cheyne-Stokes-Phänomenologie zu [25]. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Ein-Punkt-Kalibrierung eine Messung absoluter systolischer Blutdruckwerte mit hinreichender Genauigkeit ermöglicht.

#### Vorteile und Einschränkungen der Methode

Die pulslaufzeitbasierte Methode misst den Blutdruck im Schlag-zu-Schlag-Verfahren und hat damit eine ausreichende zeitliche Auflösung für die Erkennung transienter systolischer Blutdruckänderungen, wie sie zum Beispiel im Schlaf auftreten. Orthostatisch bedingte Messfehler sind bei der laufzeitbasierten Methode gering und können zudem durch Lagebestimmung minimiert werden. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber manschettensbasierten Methoden ist die praktisch rückwirkungsfreie Messung. Die Armmanschette dagegen kann im Schlaf beim Aufpumpen vegetative Reaktionen auslösen, die den Blutdruck deutlich verändern. Manschettentechniken sind deshalb nur bedingt für die Blutdruckmessung im Schlaf geeignet. Letztere hat jedoch besonders große Aussagekraft für die Diagnose der Hypertonie.

Die Präejektionszeit ist bei Verwendung der R-Zacke des EKGs ein wichtiger Teil der Laufzeit. Je nach Ableitung und Studie variierten die Anteile zwischen 12% und 35% [8, 26]. Diese Beobach-

tungen fordern eigentlich die Verwendung alternativer Messgrößen für die Erfassung des Laufzeitbeginns. Die Messergebnisse bei Verwendung von Pulslaufzeit in Kombination mit individueller Kalibrierung sind jedoch klinisch akzeptabel [6, 16, 23, 24].

#### Anwendung in der Schlafmedizin

Obwohl sich die pulslaufzeitbasierte Methode für die Erkennung schlafbezogener Blutdruckveränderungen anbietet, ist die Zahl veröffentlichter Arbeiten recht übersichtlich [23, 24, 27, 28]. Signifikante Herzfrequenzerhöhung, kombiniert mit Verkürzungen der Pulslaufzeit, wurden bei Apnoen und Hypopnoen bei Vorschulkindern mit schlafbezogenen Atmungsstörungen beschrieben [27]. Ebenfalls an Kindern wurde gezeigt, dass Änderungen der Pulslaufzeit das Verhalten des systolischen Blutdruckes in allen Schlafphasen sicher vorhersagen kann [28]. Insgesamt sind es ermutigende Befunde, die eine breite Anwendung dieses Verfahrens für die Schlafmedizin erwarten lassen. Dies sollte durch die Tatsache erleichtert werden, dass eine zusätzliche Ausstattung im Sinne von Messführlern oder Elektroden für die Blutdruckbestimmung im Schlaflabor und ambulant nicht notwendig ist.

#### Schlussfolgerungen

Die Blutdruckbestimmung mittels Pulslaufzeit und Kalibrierung liefert klinisch akzeptable systolische Blutdruckwerte. Sie kann in Bereichen eingesetzt werden, wo klassische oder Finger-manschettentechniken nicht oder weniger geeignet sind. Insbesondere in der Schlafmedizin, aber möglicherweise auch im Bereich des ambulanten Blutdruck-Monitorings, eröffnen sich attraktive Anwendungsgebiete.

#### Literatur

- 1 Jaffe LM, Kjekshus J, Gottlieb SS. Importance and management of chronic sleep apnoea in cardiology. *Eur Heart J* 2013; 34: 809–815
- 2 Phillips CL, Butlin M, Wong KK, Avolio AP. Is obstructive sleep apnoea causally related to arterial stiffness? A critical review of the experimental evidence. *Sleep Med Rev* 2013; 17: 7–18
- 3 Mitchell GF, Parise H, Benjamin EJ et al. Changes in arterial stiffness and wave reflection with advancing age in healthy men and women: the Framingham Heart Study. *Hypertension* 2004; 43: 1239–1245
- 4 Schiffrin EL. Vascular stiffening and arterial compliance. Implications for systolic blood pressure. *Am J Hypertens* 2004; 17: 395–485
- 5 Pitson DJ, Stradling JR. Value of beat-to-beat blood pressure changes, detected by pulse transit time, in the management of the obstructive sleep apnoea/hypopnoea syndrome. *Eur Respir J* 1998; 12: 685–692
- 6 Gesche H, Grosskurth D, Küchler G, Patzak A. Continuous blood pressure measurement by using the pulse transit time: comparison to a cuff-based method. *Eur J Appl Physiol* 2012; 112: 309–315
- 7 Wong MY, Pickwell-MacPherson E, Zhang YT, Cheng JC. The effects of pre-ejection period on post-exer-

- cise systolic blood pressure estimation using the pulse arrival time technique. *Eur J Appl Physiol* 2011; 111: 135–144
- 8 Payne RA, Symeonides CN, Webb DJ, Maxwell SR. Pulse transit time measured from the ECG: an unreliable marker of beat-to-beat blood pressure. *J Appl Physiol* 2006; 100: 136–141
  - 9 Versluis RG, Petri H, van de Ven CM et al. Usefulness of armspan and height comparison in detecting vertebral deformities in women. *Osteoporos Int* 1999; 9: 129–133
  - 10 Jago JR, Murray A. Repeatability of peripheral pulse measurements on ears, fingers and toes using photoelectric plethysmography. *Clin Phys Physiol Meas* 1988; 9: 319–330
  - 11 Geddes LA, Voelz MH, Babbs CF et al. Pulse transit time as an indicator of arterial blood pressure. *Psychophysiology* 1981; 18: 71–74
  - 12 Pollak MH, Obrist PA. Aortic-radial pulse transit time and ECG Q-wave to radial pulse wave interval as indices of beat-by-beat blood pressure change. *Psychophysiology* 1983; 20: 21–28
  - 13 Young CC, Mark JB, White W et al. Fleming A. Clinical evaluation of continuous noninvasive blood pressure monitoring: accuracy and tracking capabilities. *J Clin Monit* 1995; 11: 245–252
  - 14 Wippermann CF, Schranz D, Huth RG. Evaluation of the pulse wave arrival time as a marker for blood pressure changes in critically ill infants and children. *J Clin Monit* 1995; 11: 324–328
  - 15 Lutter N, Engl HG, Fischer F, Bauer RD. Noninvasive continuous blood pressure control by pulse wave velocity. *Z Kardiol* 1996; 85 (Suppl 3): 124–126
  - 16 Bartsch S, Ostojic D, Schmalgemeier H et al. Validierung der kontinuierlichen nicht-invasiven Blutdruckmessung mittels Puls-Transit-Zeit: Ein Vergleich mit der invasiven Blutdruckmessung bei Patienten einer kardiologischen Intensivstation. DEP - 20101124. *Dtsch Med Wochenschr* 2010; 135: 2406–2412
  - 17 Patzak A, Mendoza Y, Gesche H, Konermann M. Continuous blood pressure measurement by using the pulse transit time: comparison to intra-arterial measurement. *Blood press* 2015; 10: 1–5
  - 18 Sawada Y, Yamakoshi K. A correlation analysis between pulse transit time and instantaneous blood pressure measured indirectly by the vascular unloading method. *Biol Psychol* 1985; 21: 1–9
  - 19 Foo JY, Lim CS, Wang P. Evaluation of blood pressure changes using vascular transit time. *Physiol Meas* 2006; 27: 685–694
  - 20 Ma T, Zhang YT. A correlation study on the variabilities in pulse transit time, blood pressure, and heart rate recorded simultaneously from healthy subjects. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2005; 1: 996–999
  - 21 Teng XF, Zhang YT. An evaluation of a PTT-based method for noninvasive and cuffless estimation of arterial blood pressure. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2006; 1: 6049–6052
  - 22 Wong MY, Poon CC, Zhang YT. An evaluation of the cuffless blood pressure estimation based on pulse transit time technique: a half year study on normotensive subjects. *Cardiovasc Eng* 2009; 9: 32–38
  - 23 Hennig A, Gesche H, Fietze I, Penzel T, Glos M, Patzak A. Messung von apnoebezogenen Blutdruckänderungen mittels Pulstransitzeit und Penaz-Prinzip. *Atemwegs- und Lungenkrankheiten* 2012; 38: 1–8
  - 24 Schmalgemeier H, Bitter T, Bartsch S et al. Pulse transit time: validation of blood pressure measurement under positive airway pressure ventilation. *Sleep Breath* 2012; 16: 1105–1112
  - 25 Spießhöfer J, Heinrich J, Bitter T et al. Validation of blood pressure monitoring using pulse transit time in heart failure patients with Cheyne-Stokes respiration undergoing adaptive servoventilation therapy. *Sleep Breath* 2014; 18: 411–421
  - 26 Muehlsteff J, Aubert XL, Schuett M. Cuffless estimation of systolic blood pressure for short effort bicycle tests: the prominent role of the pre-ejection period. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2006; 1: 5088–5092
  - 27 Nisbet LC, Yiallourou SR, Nixon GM et al. Characterization of the acute pulse transit time response to obstructive apneas and hypopneas in preschool children with sleep-disordered breathing. *Sleep Med* 2013; 14: 1123–1131
  - 28 Vlahandonis A, Biggs SN, Nixon GM et al. Pulse transit time as a surrogate measure of changes in systolic arterial pressure in children during sleep. *J Sleep Res* 2014; 23: 406–413



#### Korrespondenz

Prof. Dr. med. Andreas Patzak  
 Institut für Vegetative Physiologie  
 Charité – Universitätsmedizin Berlin  
 Charitéplatz 1  
 10117 Berlin  
 Fax: 030/450-528972  
 E-Mail: andreas.patzak@charite.de

#### Continuous and non-interacting blood pressure measurement using the pulse transit time – For which applications is it attractive?

Measurement of blood pressure (BP) during sleep is important for diagnosis and therapy of arterial hypertension. The continuous blood pressure measurement is interesting especially for the detection of transient sleep related blood pressure fluctuations. This paper introduces a continuous, non-invasive, and indirect blood pressure measurement using the pulse transit time. Validation of this method against intra-arterial measurements and cuff-based methods reveal usefulness for the measurement of nocturnal blood pressure fluctuations. Continuous and non-interacting measurements render this method attractive for sleep medicine as well as for other applications in medicine.

#### Key words

Sleep – sleep apnoea – blood pressure – pulse wave velocity – validation of blood pressure measurement – review

#### Autorenerklärung

Der Autor berät SOMNOmedics GmbH auf dem Gebiet der Blutdruckmessung. Er erhielt Reisekostenzuschüsse für mehrere Kongressreisen.