

Pulswellenanalyse

Martin Middeke



Die Pulswellenanalyse ermöglicht es, über verschiedene nicht-invasive Verfahren die Pulswellengeschwindigkeit zu messen und den aortalen (zentralen) Blutdruck sowie die Augmentation des systolischen Blutdruckes zu bestimmen. Diese funktionellen Gefäßparameter bilden die Grundlage für eine verbesserte kardiovaskuläre Risikostratifikation, für differenzialtherapeutische Überlegungen, für eine individuelle Therapiesteuerung und spätere Verlaufskontrollen.

Bedeutung und Indikation

Unsere heutigen pathophysiologischen Konzepte basieren u. a. auf den experimentellen Befunden des Münchener Physiologen Otto Frank zu Beginn des letzten Jahrhunderts. 1904 hat er erstmalig die Pulswellenreflexion im Verlauf der Aorta beschrieben und die Pulswellengeschwindigkeit mit 7 m/sec beim Hund gemessen [1, 2].

Pulswellengeschwindigkeit – Biomarker und biologisches Alter

Die Pulswellengeschwindigkeit (PWG) ist ein wichtiger Biomarker der arteriellen Gefäßelastizität bzw. -steifigkeit. Sie ist ein starker unabhängiger Prädiktor der Morbidität und Mortalität [3, 4]. Die Gefäßsteifigkeit nimmt mit steigendem Alter zu. Beschleunigen können die arterielle Versteifung und vorzeitige Gefäßalterung die bekannten Risikofaktoren, u. a.:

- Bluthochdruck
- Rauchen
- Zucker- und Fettstoffwechselstörungen
- erhöhter Salzkonsum

Seit 2007 empfiehlt die Europäische Hypertoniegesellschaft in ihren Leitlinien die Messung der Pulswellengeschwindigkeit zur Erfassung der Gefäßsteifigkeit als Biomarker eines Endorganschadens [3]. So entwickelt sich die Pulswellenanalyse neben der Gefäßmorphologie (z. B. Intima-Media-Dicke) zu einem wichtigen vaskulären Biomarker, der ab einem Wert von ca. 11 m/s einen anerkannten manifesten Endorganschaden darstellt [3–5]. Die PWG ist nicht nur für Hypertoniker und die antihypertensive Behandlung bedeutend. Sie korreliert sehr stark mit dem Alter und ist somit geeignet, das Alter der Gefäße und damit das biologische Alter entsprechend der These „man ist so alt wie seine Gefäße“ zu bestimmen.

Merke

Die PWV steigt kontinuierlich von ca. 5 m/s bei gesunden Kindern auf > 12 m/s im höheren Alter an [5]. Bei Patienten mit schwerer Arteriosklerose kann man bereits im jüngeren und mittleren Lebensalter deutlich höhere Werte messen.

Augmentation und zentraler aortaler Blutdruck

Neben der PWG erlaubt die Pulswellenanalyse die Bestimmung weiterer wichtiger Parameter. Die Ableitung der sog. Augmentation des Blutdruckes, d. h. einer übersteigerten reflektierten Welle mit Erhöhung des systolischen Blutdruckes bei erhöhter Gefäßsteifigkeit, lässt Rückschlüsse auf die Impedanz der zentralen Aorta und auf die pulsatile vaskuläre Nachlast zu. Sie ermöglicht außerdem die Berechnung des zentralen (aortalen) Blutdruckes [6, 7]. Diese Größen determinieren das Ausmaß der arteriellen Schädigung und der kardialen Belastung [8, 10]. Eine mittels PWA ermittelte erhöhte Gefäßsteifigkeit ist mit einem gesteigerten kardiovaskulären und renalen Risiko verbunden [4]. Man kann sie durch Antihypertensiva unterschiedlich beeinflussen [9] und auch durch nicht-medikamentöse Maßnahmen vermindern. Eine Therapiesteuerung nach Maßgabe des zentralen/aortalen Druckes ist dem konventionellen Vorgehen wahrscheinlich überlegen. Selbstverständlich kann man auch die vaskulären Schäden durch die klassischen Risikofaktoren mit der Pulswellenanalyse verfolgen und den Therapieerfolg dokumentieren.

Vorteile des zentralen aortalen Blutdruckes

Der zentrale aortale Blutdruck hat hinsichtlich Risikostratifikation und antihypertensiver Therapie größere Bedeutung als der brachiale Blutdruck [10]. Dies beruht auf der Nähe zu den zentralen Organen. Besonders gilt das für bestimmte Personengruppen und/oder Risikopatienten; beispielsweise ist die gutartige juvenile systolische Hypertonie mit erhöhtem brachialem Druck, aber normalem bzw. niedrigem aortalen Blutdruck, nur mittels PWA

► **Tab. 1** Alphabetische Listung der Geräte zur Pulswellenanalyse. Die Auswahl betrifft Geräte, die in entsprechenden Studien mittels invasiver Messung des aktuellen Aortendruckes und der Druckkurve untersucht und validiert wurden [7].

Geräte	Arterie	Pulswellenableitung	Nichtinvasive Ableitung des aortalen BD	Bemerkungen
Arteriograph	A. brachialis	Oszillometrie	Wellenanalyse	Messung mit Oberarmmanschette (erstes Gerät dieser Art mit guter klinischer Erfahrung, einfache Handhabung, gute Datenlage): AoB, Aix, PWG, Visualisierung der Pulswelle (► Abb. 3, 4); ABDM möglich
BPro	A. radialis	Applanations-tonometrie	n-point moving average	Messung mit fixierten Handgelenksgerät: AoB, Aix, keine PWG, singulär und 24 Stunden (exakte Positionierung über 24 Std. schwierig, keine Normwerte); es wird nur eine initiale (externe) Blutdruckmessung zur Kalibrierung eingegeben.
Complior	A. carotis	Applanations-tonometrie	„direkt“ wg. der Nähe zur Aorta	Zeitaufwendig und untersucherabhängig (evtl. zwei Untersucher): AoB, Aix, PWG; gute Datenlage
Mobil-O-Graph	A. brachialis	Oszillometrie	Transfer-Funktion	Messung mit Oberarmmanschette: AoB, Aix, PWG; geeignet für singuläre Messung und ABDM (keine Normwerte für Tag/Nacht); PWG nur auf das Alter bezogen
Omron HEM-9000 AI	A. radialis	Applanations-tonometrie	Wellenanalyse	Zur automatischen Abtastung der Pulswelle wird die Hand in das Gerät platziert: AoB, Aix, keine PWG; gute Datenlage
SphygmoCor	A. radialis A. brachialis	Applanations-tonometrie	Transfer-Funktion	Zeitaufwendig und untersucherabhängig (Training notwendig); für PWG zusätzliche Oberschenkelmanschette und Tonometrie (A. carotis), gute Datenlage
Vicorder	A. brachialis A. carotis	Oszillometrie	Transfer-Funktion	Messung mit Oberarmmanschette (AoB, Aix); aufwendig für PWG mit zusätzlicher Oberschenkelmanschette und Halsband für die Ableitung der Pulswelle über A. carotis

AoB = zentraler aortaler Blutdruck, Aix = Augmentationsindex, ABDM = Ambulante Blutdruck-Langzeitmessung über 24 Std. PWG = Pulswellengeschwindigkeit.

von der behandlungsbedürftigen isolierten systolischen Hypertonie (ISH) im Alter mit erhöhter Augmentation und erhöhtem zentralen aortalen Blutdruck unterscheidbar. Andererseits kann bei normalen brachialen Blutdruckwerten eine „maskierte“ Hypertonie mit erhöhtem zentralem Blutdruck durch die PWA demaskiert werden, z. B. bei Patienten mit typischen hypertensiven Organschäden.

Durchführung: Die Messung

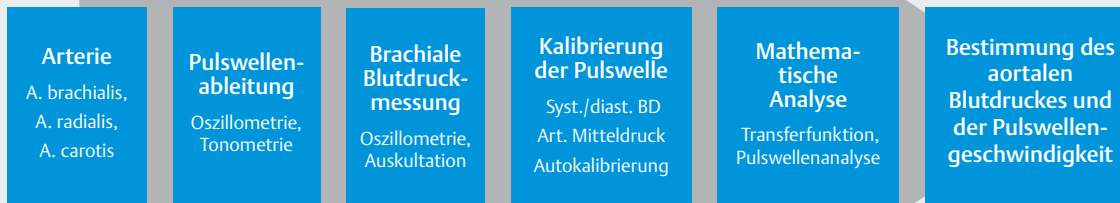
Prinzip

Die Pulswellenanalyse beruht darauf, die Druckkurve über einer oberflächlich gelegenen Arterie aufzuzeichnen (A. brachialis, A. radialis oder A. carotis). Dabei werden die abgeleiteten Signale (Druck, Volumen, Fluss) zeitlich einander zugeordnet. Aus dem räumlichen Abstand der Pulsableitungsorte und der zeitlichen Verzögerung, mit

der die Pulswelle am distalen Ort eintrifft, ergibt sich die Pulswellengeschwindigkeit (Weg/Zeit). Aus der Druckwellenkontur lässt sich der Augmentationsindex errechnen und mit einer mathematischen Transferfunktion kann der zentrale aortale Blutdruck bestimmt werden.

Methoden und Geräte

Die rasanten Entwicklungen der Geräteindustrie auf dem Gebiet der PWA in den letzten Jahren ermöglichen uns heute im klinischen Alltag die nicht-invasive Bestimmung des zentralen aortalen Blutdruckes und weiterer hämodynamischer Parameter – vor allem durch Mikroprozessoren und komplexe Datenverarbeitung. Eine Reihe unterschiedlicher Verfahren stehen zur Verfügung (► **Tab. 1**). Sie basieren auf der Messung des brachialen Blutdruckes und der Kalibrierung der Pulswelle, die gleichzeitig über einer der drei genannten Arterien ermittelt wird (► **Abb. 1**).



► **Abb. 1** Schematische Darstellung der Methodik zur nicht-invasiven Bestimmung des aortalen/zentralen Blutdruckes: die Ableitung der Pulswelle erfolgt entweder oszillometrisch mit der Oberarmmanschette über der A. brachialis oder tonometrisch über der A. radialis oder der A. carotis; Blutdruck (systolisch und diastolisch) und Herzfrequenz werden mit der Oberarmmanschette gemessen und daran erfolgt die automatische Kalibrierung der Pulswelle; mittels Transferfunktion werden der aortale/zentrale Blutdruck und die Pulswellengeschwindigkeit errechnet (nach [7]).

Merke

Den brachialen Blutdruck bestimmt man konventionell-automatisch (oszillometrisch oder auskultatorisch). Die Pulswelle wird bei der oszillometrischen Methode automatisch aufgezeichnet oder mittels Applanations-Tonometrie erfasst.

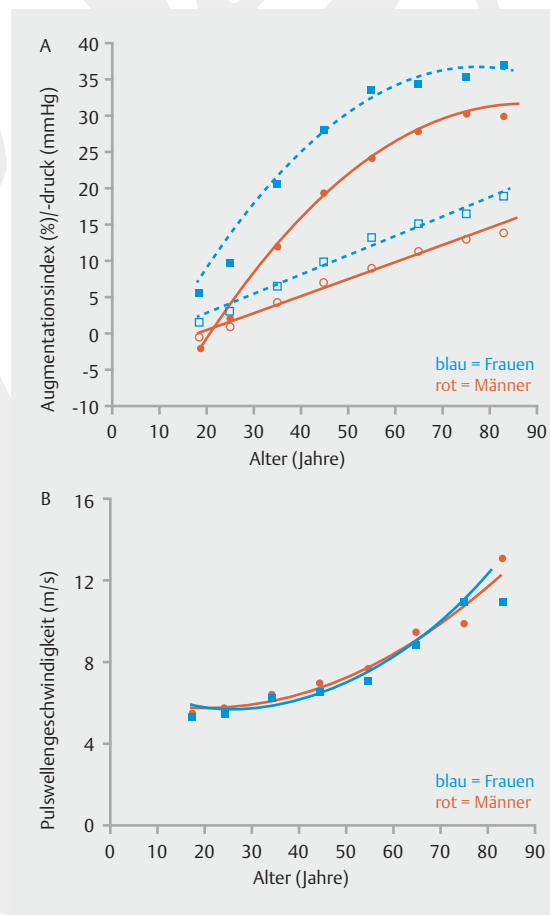
Die Kalibrierung der Pulswelle mit dem gemessenen Blutdruck und die anschließende mathematische Analyse zur Bestimmung des zentralen aortalen Blutdruckes und weiterer Parameter unterliegen der internen Methodik der verschiedenen Systeme. Die in ► **Tab. 1** aufgeführten Geräte sind sämtlich validiert mittels invasiver, intraarterieller Messung des aortalen systolischen Blutdruckes [7]. Wegen der anatomischen Nähe entspricht die Ableitung der Druckwelle über der A. carotis in etwa derjenigen der Aorta („direkte“ Ableitung mit Complior). Für einige Systeme ist die Messung der Aortenlänge bzw. des Jugulum-Symphyse-Abstandes zur Bestimmung der Pulswellengeschwindigkeit notwendig.

Ähnlich der Blutdruckmessung

Die Applanations-Tonometrie ist zeitaufwendig und untersucherabhängig (Auffinden der optimalen Druckwelle über den Arterien). Dagegen ist die in die Blutdruckmanschette integrierte Ableitung der Druckkurve am Oberarm die einfachste Lösung für die tägliche Routine. Sie wird wie eine konventionelle Blutdruckmessung durchgeführt: üblicherweise im Liegen, in entspannter Atmosphäre. Der Praxis- bzw. Weißkitteleffekt kann dabei den aortalen Blutdruck in gleicher Weise erhöhen wie den brachialen. Dementsprechend sind evtl. Mehrfachmessungen notwendig.

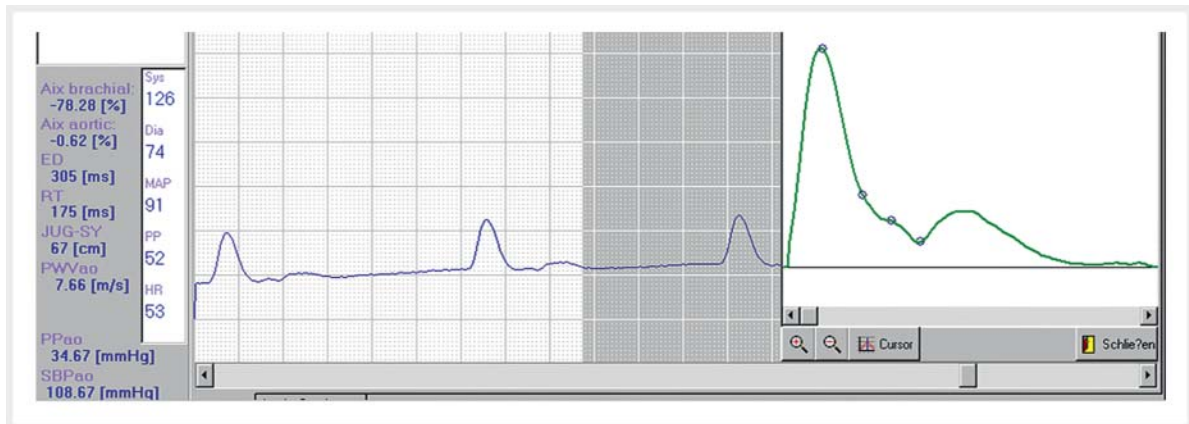
Cave

Die Pulswellengeschwindigkeit ist in gewissem Maß abhängig von der Blutdruckhöhe. Bei erhöhtem Blutdruck sollte man mindestens zweimal im Abstand von

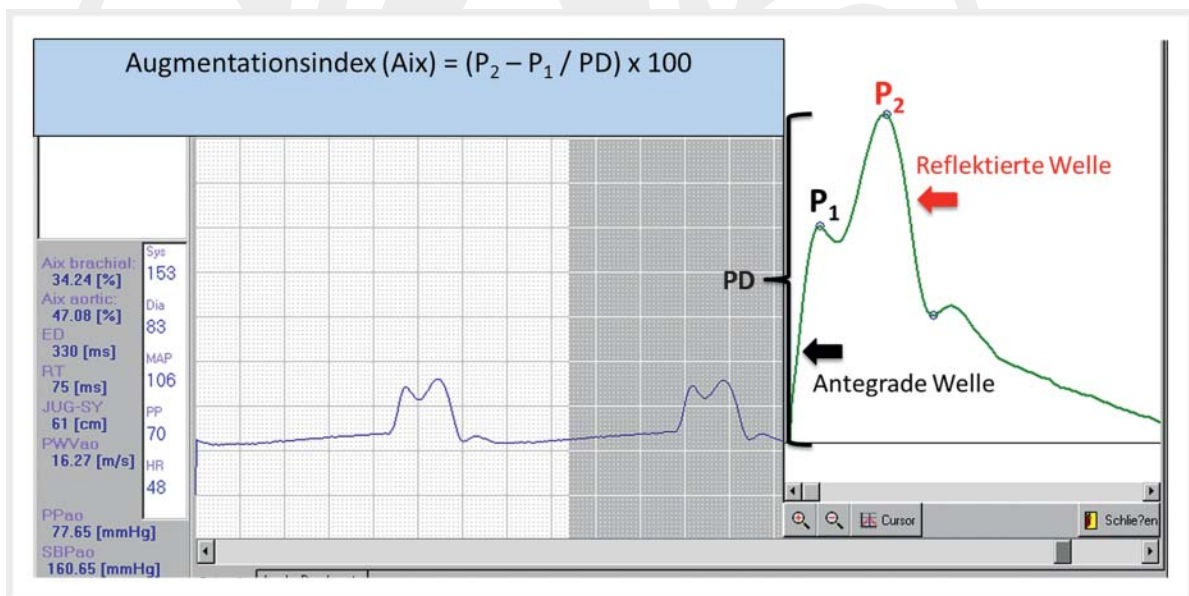


► **Abb. 2** Normwerte für Augmentationsindex **A** und Pulswellengeschwindigkeit **B** [12].

zwei Minuten messen, um den Praxisseffekt zu minimieren. Die Verlaufskontrollen sollten unter gleichen Bedingungen erfolgen.



► **Abb. 3** Normale Druckkurve bei einem jungen Mann (22 Jahre): brachialer Blutdruck 126/74 mmHg, zentraler aortaler Blutdruck systolisch 108 mmHg (Normwert < 110), Pulswellengeschwindigkeit 7,6 m/sec (Normwert < 11).



► **Abb. 4** Druckkurve bei einem älteren Patienten (73 Jahre) mit isolierter systolischer Hypertonie (ISH): brachialer Blutdruck 153/83 mmHg. Erhöhung (Augmentation) des systolischen Drucks durch die reflektierte Welle (Augmentationsindex 47 %) und erhöhter zentraler aortaler Blutdruck mit 160 mmHg (Altersnorm < 130), Pulswellengeschwindigkeit 16,2 m/sec (Norm < 11). PD = Pulsdruck.

Messwerte und Analyse

Pulswellengeschwindigkeit

Gemessen in m/sec ist sie die Geschwindigkeit, mit der die systolische Druckwelle aus dem Herzen durch die großen Arterien den Organismus durchläuft. Der mechanische Impuls, der durch die systolische Ventrikel-Kontraktion generiert und über die Gefäßwand fortgeleitet wird, ist höher als die Strömungsgeschwindigkeit des Blutes. Die Fließgeschwindigkeit des Blutes ist wesentlich geringer als die Pulswellengeschwindigkeit. Man kann die Puls-welle vergleichen mit der Ausbreitung der Welle, die entsteht, wenn ein Stein ins Wasser geworfen wird.

Normwerte für die Pulswellengeschwindigkeit finden sich in ► **Abb. 2**.

Merke
Der Einfluss der Herzfrequenz wird bei der Bestimmung der Pulswellengeschwindigkeit und des systolischen Augmentationsindexes berücksichtigt. Daher wird die Normierung auf eine Herzfrequenz von 75/min durchgeführt.

Systolischer Augmentationsindex

Die Puls-welle wird in der Peripherie reflektiert und läuft zurück zum Herzen. Die reflektierte Druckwelle addiert sich zur antegrad laufenden Welle. Je steifer die Gefäße,

umso ausgeprägter und schneller ist die Reflexion der Druckwelle. Zwischen der Herzfrequenz und der Reflexion der Druckwelle besteht eine enge inverse Beziehung: mit niedrigerer Herzfrequenz nimmt die Reflexion zu [11]. Als Augmentation bezeichnet man in diesem Zusammenhang eine Erhöhung der systolischen Druckwelle durch die reflektierte Welle: in ► **Abb. 4** der Anstieg von P1 zu P2. Diesen durch die reflektierte Welle verursachten Druckanstieg nennt man Augmentationsdruck (AugP), und der Anteil dieses AugP am Pulsdruck (systolischer minus diastolischer Druck oder Blutdruckamplitude) wird als Augmentationsindex (AIx) bezeichnet (Normwerte ► **Abb. 2**).

Zentraler aortaler Blutdruck

Basierend auf mathematischen Algorithmen (z. B. Transferfunktionen) kann von der peripheren Pulswelle (A. radialis, A. brachialis, A. carotis) auf die zentrale Pulswelle und damit auf den zentralen aortalen Blutdruck rückgeschlossen werden (► **Abb. 3, 4**). Dabei kann der aortale Blutdruck dem brachialen Druck entsprechen oder deutlich nach oben oder unten abweichen. Bei gesunden, elastischen Gefäßen wird in der Regel ein niedrigerer zentraler Druck gemessen (keine bzw. negative Augmentation) und bei älteren, steifen Gefäßen wird ein höherer zentraler Druck gemessen (erhöhter/positiver Augmentationsindex). In jüngeren Jahren und bei gesunden Gefäßen wird somit der zentrale aortale Blutdruck durch die Oberarmmessung überschätzt. Im Alter und bei steifen Gefäßen verhält es sich umgekehrt.

Widmung

In Erinnerung an Guiseppe Schillaci (1961 – 2016), Perugia – ein Pionier der modernen Pulswellenanalyse

Interessenkonflikt

Der Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Über die Autoren



Prof. Dr. med. Martin Middeke
Hypertoniezentrum München

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. Martin Middeke
Hypertoniezentrum München
Excellence Centre of the European Society of Hypertension
Herzzentrum Alter Hof München
Dienerstr. 12
D-80331 München
Martin.Middeke@gmx.de
www.hypertoniezentrum.de

Literatur

- [1] Frank O. Der Puls in den Arterien. *Z Biol* 1904; 46: 441 – 453
- [2] Middeke M. Otto Frank, der Dynamiker. *Dtsch Med Wochenschr* 2012; 137: 2706 – 2711
- [3] Mancia G, De Backer G, Dominiczak A et al. Guidelines for the Management of Arterial Hypertension. *J Hypertens* 2007; 25: 1105 – 1118
- [4] Vlachopoulos C, Aznaouridis K, O'Rourke MF et al. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with central haemodynamics: a systematic review and meta-analysis. *Eur Heart J* 2010; 31: 1865 – 1871
- [5] Baulmann J, Nürnberger J, Slany J et al. Arterielle Gefäßsteifigkeit und Pulswellenanalyse Positionspapier zu Grundlagen, Methodik, Beeinflussbarkeit und Ergebnisinterpretation. *Dtsch Med Wochenschr* 2010; 135 (Suppl. 1): S4 – S14
- [6] Herbert A, Cruickshank JK, Laurent S et al. Establishing reference values for central blood pressure and its amplification in a general healthy population and according to cardiovascular risk factors. *Eur Heart J* 2014; 35: 3122 – 3133
- [7] Papaioannou TG, Karageorgopoulou TD, Sergentanis TN et al. Accuracy of commercial devices and methods for non-invasive estimation of aortic systolic blood pressure: a systematic review and meta-analysis of invasive validation studies. *J Hypertens* 2016; 34 (7): 1237 – 1248
- [8] Middeke M. Augmentation des aortalen Blutdruckes. Ursachen, kardiale Folgen und Konsequenzen für die antihypertensive Therapie. *Akt Kardiologie* 2013; 2: 151 – 156
- [9] Williams B, Lacy PS, Thom SM et al. Differential impact of blood pressure-lowering drugs on central aortic pressure and clinical outcomes: principal results of the Conduit Artery Function Evaluation (CAFE) study. *Circulation* 2006; 113: 1213 – 1225
- [10] Kollias A, Lagou S, Zeniodi ME et al. Association of Central Versus Brachial Blood Pressure With Target-Organ Damage: Systematic Review and Meta-Analysis. *Hypertension* 2016; 67 (1): 183 – 190
- [11] Williams B, Lacy PS et al. Impact of heart rate on central aortic pressures and hemodynamics: analysis from the CAFE study: CAFE Heart Rate. *J Am Coll Cardiol* 2009; 54 (8): 705 – 713
- [12] McEniery CM, Yasmin Hall IR] et al. Normal vascular aging: differential effects on wave reflection and aortic pulse wave velocity: the Anglo-Cardiff Collaborative Trial (ACCT). *Am Coll Cardiol* 2005; 46: 1753 – 1760

Bibliografie

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0043-106633>
Dtsch Med Wochenschr 2017; 142: 1461–1465
© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0012-0472