

AUS DEM LEHRSTUHL FÜR  
ANÄSTHESIOLOGIE  
*PROF. DR. B. M. GRAF*  
DER MEDIZINISCHEN FAKULTÄT  
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

Oszillometrische Blutdruckmessung am Unterschenkel an Probanden in Bauchlage  
und unfallchirurgischen Patienten in Allgemeinanästhesie und Bauchlage -  
eine vergleichende Messung zum etablierten Standard am Oberarm

Inaugural - Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin

der  
Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

vorgelegt von  
Christoph Fiegl

2016

Dekan:	Prof. Dr. Dr. Torsten E. Reichert
1. Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. T. Metterlein
2. Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. K.-P. Ittner
Tag der mündlichen Prüfung:	26.01.2016

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	S. 3
1.1	Das arterielle Gefäßsystem als komplexer Wellenleiter	S. 4
1.2	Der menschliche Blutdruck	S. 7
1.3	Determinanten der Organperfusion	S. 9
1.4	Der perioperative Blutdruck – ein unabhängiger Morbiditätsfaktor	S. 12
1.5	Intraoperative Hypotension	S. 14
1.5.1	Risikofaktoren und Prädiktoren einer Hypotension unter Allgemeinanästhesie	S.15
1.5.2	Hämodynamische Auswirkungen der Allgemeinanästhesie	S.16
1.6	Die nichtinvasive Blutdruckmessung – Möglichkeiten und Grenzen	S. 18
1.6.1	Das oszillometrische Messprinzip	S. 20
1.6.2	Einflussgrößen auf das oszillometrische Messverfahren	S. 23
1.6.2.1	Die Blutdruckmanschettengröße	S. 23
1.6.2.2	Die Blutdruckmanschetten-Lokalisation	S. 25
2.	Fragestellung der Promotionsarbeit	S. 26
3.	Material und Methode	S. 27
3.1	Probanden	S. 27
3.2	Patienten	S. 27
3.2.2	Allgemeinanästhesie in der Patientengruppe	S. 28
3.3	Lagerung	S. 29
3.4	Blutdruckmessgeräte	S. 30
3.4.1	Technische Daten der eingesetzten Blutdruckmessgeräte	S. 31
3.4.2	Berücksichtigung der Blutdruckmanschettengröße	S. 31
3.4.3	Positionierung der Blutdruckmanschetten	S. 33
3.5	Vorgehensweise der Datenerhebung	S. 33
3.5.1	Zeitlicher Ablauf der Messungen	S. 33
3.6	Statistische Auswertung	S. 34

4.	Ergebnisse	S. 35
4.1	Demographische Daten der Probandengruppe	S. 35
4.2	Demographische Daten der Patientengruppe	S. 35
4.3	Messwerte	S. 37
5.	Diskussion	S. 47
5.1	Vergleichende Blutdruckmessung in der Probandengruppe	S. 48
5.2	Vergleichende Blutdruckmessung in der Patientengruppe	S. 50
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	S. 60
6.	Literaturverzeichnis	S. 63
7.	Anhang	S. 71
7.1.	Messwerte	S. 71
7.2	Streudiagramme	S. 75
7.3	Bland-Altman-Plots	S. 79
7.4	Student-t Verteilung – Tabelle	S. 83

## **1. Einleitung**

Die nichtinvasive arterielle Blutdruckmessung ist ein seit Jahrzehnten angewandtes Verfahren zur Bestimmung des Patientenblutdrucks und wird in der klinischen Medizin breit eingesetzt [1].

Während die nichtinvasive Blutdruckmessung am Oberarm (über der Arteria brachialis) als Goldstandard etabliert ist, muss gerade bei der perioperativen Überwachung regelmäßig auf einen alternativen Messort zur nichtinvasiven Blutdruckmessung ausgewichen werden [2]. Ursachen dafür können patientenimmanent sein oder die intraoperative Lagerung selbst macht eine Blutdruckmessung am Oberarm unmöglich.

Eine akkurate Blutdruckmessung ist die unabdingbare Voraussetzung zur zeitgerechten Detektion und Therapie einer hämodynamischen Störung des Patienten. Sie muss daher an jedem Messort und in jeder Phase der Operation gewährleistet sein. Trotz des breiten Einsatzes der nichtinvasiven Blutdruckmessung im stationären und ambulanten Bereich ist diese jedoch immer noch mit nicht unerheblichen Messungenauigkeiten und Problemen in ihrer Handhabung behaftet.

Pickering fasst diese Tatsache mit folgenden Worten zusammen:

*„Blood pressure determination continues to be one of the most important measurements in all of clinical medicine and is still one of the most inaccurately performed” [3].*

Mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche in den Datenbanken Medline und Embase wurde die vorhandene Literatur zu dieser Fragestellung gesichtet. Mehrere Publikationen hatten sich mit der vergleichenden Blutdruckmessung an oberer und unterer Extremität bereits auseinandergesetzt. Die nichtinvasive oszillometrische Blutdruckmessung an der unteren Extremität sowohl bei Probanden, als auch bei Patienten in Allgemeinanästhesie unter Berücksichtigung der intraoperativen Lagerung wurde bis jetzt jedoch noch nicht untersucht.

Neben dem Verständnis für das verwendete Blutdruckmessverfahren sind physio-anatomische Kenntnisse des Herz-Kreislaufsystems unerlässlich um die nichtinvasive Blutdruckmessung richtig zu interpretieren und daraus geeignete therapeutische Konsequenzen ziehen zu können.

## **1.1 Das arterielle Gefäßsystem als komplexer Wellenleiter**

Im Jahre 1628 beschrieb William Harvey, ein englischer Arzt und Anatom, in seinem Werk „Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus“ die Funktion und das Zusammenwirken von Herz und Gefäßsystem und bereitete damit den Weg der modernen Kreislauf-Physiologie [4]. Das Gefäßsystem selbst übt neben der eigentlichen Transportfunktion des Blutes auch eine modulierende Funktion auf die vom Herzen generierten zyklischen Druckschwankungen in den arteriellen Blutleitern aus. Insofern ist dies von erheblicher physiologischer Bedeutung, als die sogenannte „Dämpfungseigenschaft“ des arteriellen Gefäßsystems die zyklischen Druckschwankungen im Blutgefäß sukzessive in einen kontinuierlichen Blutfluss umwandelt. Die Mikrozirkulation und somit die Endorgane werden dadurch vor einer erhöhten Drucktransmission geschützt und der resultierende kontinuierliche Blutfluss gewährleistet eine optimale, gleichmäßige Sauerstoffversorgung und Nutrition der Organe [5].

Während der Austreibungsphase des Herzens wird ein definiertes Blutvolumen, das Schlagvolumen, aus dem linken Ventrikel in die Aorta verschoben. Die Massenträgheit der inkompressiblen Blutsäule im Blutgefäß verursacht zunächst einen lokalen Druckanstieg in der proximalen Aorta. Viskoelastische Eigenschaften der Aorta und der zentralen Arterien bewirken unter der Zunahme des transmuralen Drucks eine Dehnung der Gefäßwand mit lokaler Querschnittserweiterung. Ein Teil des Schlagvolumens wird so im Blutgefäß vorübergehend gespeichert und erst zeitverzögert während der Diastole des Herzzyklus nach distal vorangetrieben. Dieses viskoelastische Verhalten folgt dem Volumenelastizitätsmodul der Gefäßwand und zeigt einen nichtlinearen Verlauf, den sogenannten Young's Modulus [5] – vergleiche Infobox 1. Bei geringer Gefäßvordehnung wirkt überwiegend Elastin, das eine gute Compliance aufweist, dem transmuralen Druck in der Gefäßwand entgegen. Mit zunehmender Gefäßwanddehnung sind es vorwiegend die Kollagenfasern, die sich dem transmuralen Druck in der Gefäßwand widersetzen, die Compliance nimmt sukzessive ab. Dies gewährleistet ein limitiertes Blutpooling in der Aorta und in den zentralen Gefäßen während der linksventrikulären Auswurfphase.

Der Druckgradient, der sich dabei zwischen dem dilatierten und dem folgenden Arteriensegment ausgebildet hat, ist die treibende Kraft zur Beschleunigung und zum Vorwärtstrieb des im Gefäßlumen gespeicherten anteiligen Schlagvolumens. Speicherung, Entspeicherung und Weiterströmung des anteiligen Schlagvolumens sind simultan ablaufende Phänomene, die als Pulswelle wahrgenommen werden können.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Pulswelle ist dabei von der Massendichte des Blutes und der Gefäß-Compliance abhängig.

Aufgrund der unterschiedlichen Dichte und der Anordnung von Elastin und Kollagen in der Gefäßwand nimmt die Compliance des arteriellen Gefäßsystems physiologischerweise von proximal nach distal ab. Dies führt zu einer nach distal zunehmenden Pulswellengeschwindigkeit, zum anderen zu einer Zunahme des arteriellen Spitzendruckes und der Druckpulsamplitude.

Volumenelastizitätsmodul:	$\chi = \Delta P / \Delta V \times V$
Gefäß - Compliance:	$C = \Delta V / \Delta P$
Pulswellengeschwindigkeit:	$c = (\chi / \sigma)^{-1/2}$
Wellenimpedanz:	$Z = \Delta P / \Delta I = \sigma \times c / Q$
Reflexionsfaktor:	$R = \Delta P_{rW} / \Delta P_{aW}$ $= (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$

Infobox 1 – Quelle: nach [5]

Die Pulswelle setzt sich aus drei Grundphänomenen zusammen. Dem Druckpuls, dem Strömungspuls und dem Querschnitts- oder Volumenpuls. In einem System, in dem die Pulswelle nur in eine Richtung läuft, zeigen die drei Grundphänomene der Pulswelle zeitlich übereinstimmende Kurvenverläufe. Im

arteriellen System, als komplexen Wellenleiter, kommt es durch Reflexion von Pulswellen zu hin- und herlaufenden Wellen, die zu Wellenüberlagerungen, so genannten Interferenzen oder Superpositionsphänomenen führen [5]. Querschnittsänderungen im Gefäßsystem, Gefäßabzweigungen, Änderungen der Wanddicke und Wandelastizität verursachen eine Widerstandsänderung (Impedanzänderung) im Gefäßsystem, die gleichmäßig oder sprunghaft erfolgen kann – vergleiche Infobox 1.

Treffen Pulswellen auf eine solche Impedanzänderung, kommt es zur Reflexion der Pulswelle. Das Ausmaß der Pulswellenreflexion wird dabei von der Größe der Impedanzänderung bestimmt.

Im arteriellen Gefäßsystem bewegt sich der Reflexionsfaktor zwischen +0,1 bis +0,4. Diese partielle Reflexion führt zu retrograd laufenden Pulswellen im Gefäß mit folgender Überlagerung der hin- und herlaufenden transversalen, mechanischen Wellen. Die jeweiligen Pulswellenphänomene zeigen bei der Überlagerung ein uneinheitliches Verhalten.

---

Legende Infobox 1:  $\Delta P$ : Druckgradient über dem Gefäßabschnitt,  $\Delta V$ : Volumenänderung,  $V$ : Ausgangsvolumen,  $c$ : Pulswellengeschwindigkeit,  $\chi$ : Volumenelastizitätsmodul,  $\sigma$ : Massendichte des Blutes,  $\Delta I$ : Änderung des Volumenstroms,  $Q$ : Gefäßquerschnitt,  $R$ : Reflexionsfaktor,  $\Delta P_{rW}$ : Druckamplitude der reflektierten Welle,  $\Delta P_{aW}$ : Druckamplitude der antegrad laufenden Welle

Gegenläufige Druckpulswellen addieren sich, gegenläufige Strompulswellen subtrahieren sich. In Abhängigkeit von der Phase, in der die Wellenphänomene aufeinander treffen, nimmt demnach die Pulsdruckamplitude und damit der Spitzendruck zu und gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeit des Blutes ab. Die Phasenverschiebung zweier aufeinander treffender Pulswellen hängt zum einen von der Pulswellengeschwindigkeit und zum anderen von der Entfernung vom Reflexionsort ab. Druckpulswellenüberlagerungen nahe am Reflexionsort, das heißt in der Gefäßperipherie, sind daher aufgrund der kurzen Laufzeit nahezu phasengleich und addieren sich praktisch vollständig.

Druckpulswellenüberlagerungen im Bereich von Aorta und zentralen Gefäßen weisen laufzeitbedingt eine relevante Phasenverschiebung auf.

Die resultierende Druckpulskurve ist durch eine doppelgipflige Kontur charakterisiert und der arterielle Spitzendruck ist kleiner als die Summe der Spitzendrucke der zugrunde liegenden hin- und herlaufenden Druckpulswellen - siehe dazu Abbildung 1.

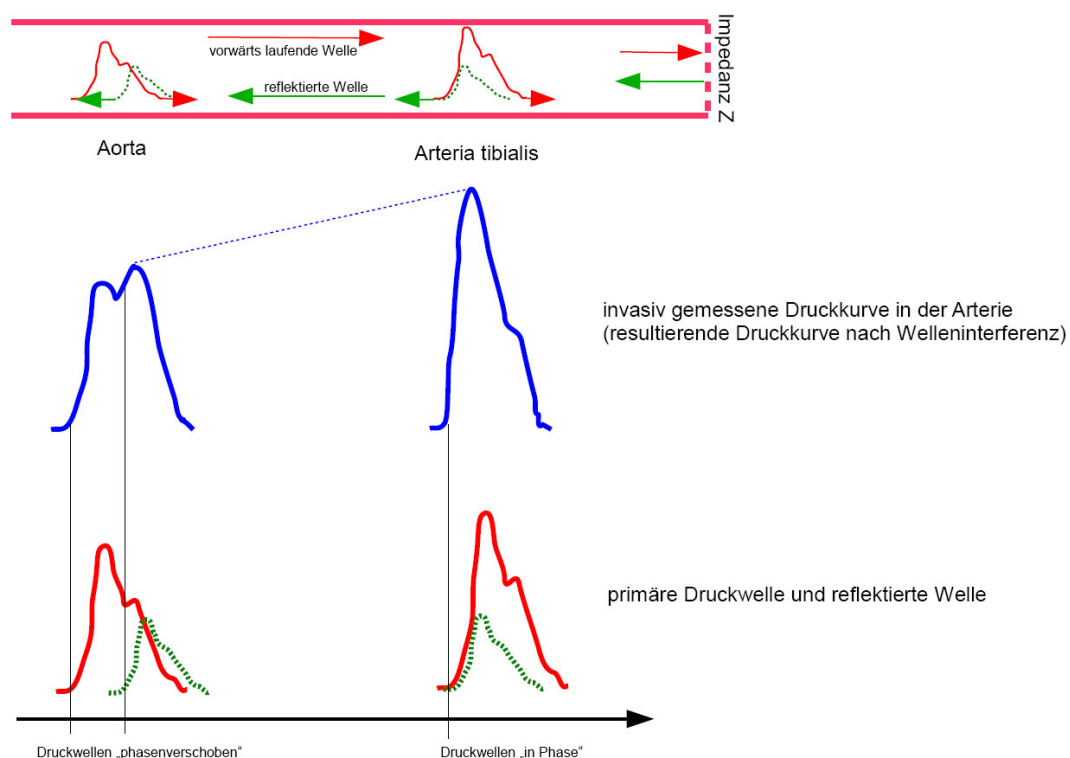


Abbildung 1: Interferenz reflektierter Wellen in Abhängigkeit des Messortes und der Laufzeit der reflektierten Welle; blau: resultierende Druckkurve nach Welleninterferenz, rot: nach proximal laufende Druckpulswelle, grün: gegenläufige reflektierte Druckpulswelle (Quelle: modifiziert nach [5])

Durch die geringere Pulswellenlaufgeschwindigkeit in den zentralen Gefäßen erreichen die reflektierten Pulsdruckwellen die Aorta erst am Ende der Systole, beziehungsweise in der Diastole des Herzzyklus – zum Zeitpunkt der Welleninterferenz liegt eine deutliche



Phasenverschiebung der Druckpulswellen vor. Dadurch fällt der systolische Spitzendruck in den zentralen Gefäßen erheblich niedriger aus als in der Gefäßperipherie. Diese physiologischen Gefäßeigenschaften ökonomisieren die Herzarbeit, da die kardiale Nachlast als eine Determinante des myokardialen Sauerstoffverbrauchs reduziert wird. Zudem führt die Pulswellenamplifikation in der Diastole des Herzzyklus zu einer Anhebung des diastolischen Blutdrucks mit konsekutiver Erhöhung des arteriellen Mitteldrucks. Dieses Blutdruckverhalten wirkt sich somit positiv auf die Organperfusion im Allgemeinen und die Koronarperfusion im Speziellen aus.

Auf ihrem Weg in die Gefäßperipherie wird die Pulswelle folglich durch das arterielle Gefäßsystem wesentlich beeinflusst und verändert. Dies lässt sich in vier Phänomene zusammenfassen:

- (1) Dämpfungsfunktion – hochfrequente Komponenten, wie die „Klappeninzisur“ werden unterdrückt
- (2) Zunahme der Pulsdruckwelle und damit des systolischen Spitzendruckes in der Gefäßperipherie
- (3) Abnahme des diastolischen Blutdrucks in der Gefäßperipherie
- (4) Zunahme der Diastolendauer der Pulswelle [6]

## **1.2 Der menschliche Blutdruck**

Die zyklischen Druckschwankungen im Gefäßsystem können an verschiedenen Stellen des menschlichen Körpers invasiv oder nichtinvasiv als Blutdruck gemessen werden.

Der maximale Druckwert im arteriellen Gefäßsystem, der während der systolischen Austreibungsphase des Herzens im Gefäß erreicht wird, ist als systolischer Blutdruck (SAP) definiert. Der minimale Druckwert, der am Ende der Diastole im Gefäßsystem messbar ist, wird diastolischer Blutdruck (DAP) genannt.

Die Differenz der maximalen und minimalen Blutdruckausprägung ist die Blutdruckamplitude (Druckpuls). Sie ist eine Funktion des Schlagvolumens des Herzens und der Compliance des Gefäßsystems [7]:

Zusammengefasst werden kann dies in folgender Gleichung:

$$\text{Druckänderung im Blutgefäß} = \text{Volumenänderung im Blutgefäß} / \text{Volumendehnbarkeit}$$

Das Flächenprodukt aus Blutdruck und Dauer eines Herzzyklus dient als Grundlage zur Berechnung des mittleren arteriellen Blutdrucks (MAP). Der MAP teilt die Fläche unter der Blutdruckamplitude so, dass die Fläche unter der Druckkurve (F1) der Summe der beiden Flächen (F2 + F3) über der Druckkurve während eines Herzzyklus entspricht – vergleiche Abbildung 2.

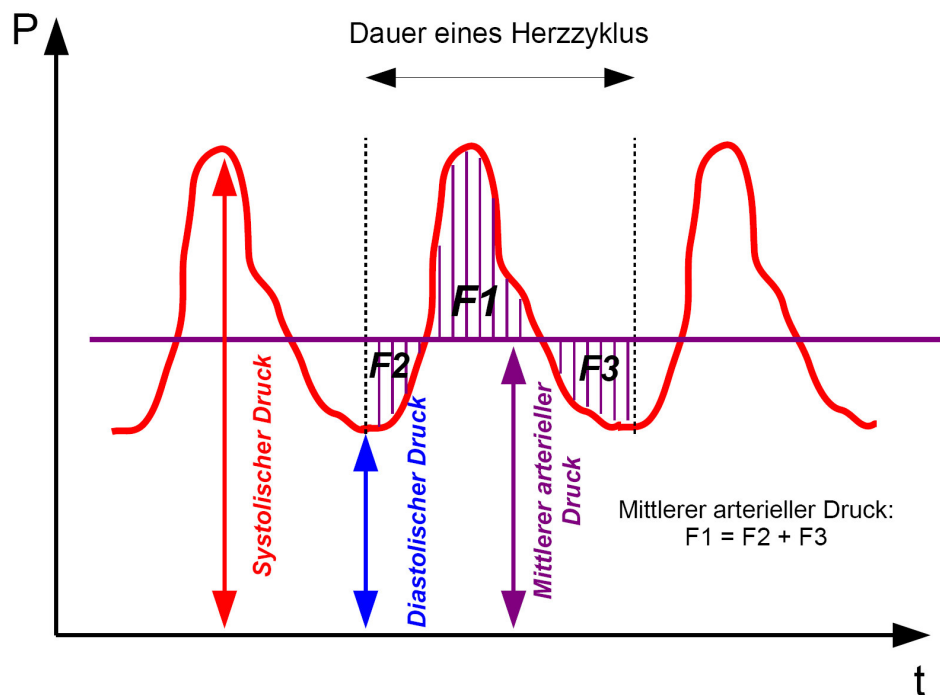


Abbildung 2: Der mittlere arterielle Blutdruck (Quelle: modifiziert nach [7])

Der MAP, als zeitgewichteter Durchschnittswert des arteriellen Blutdrucks wird zur Berechnung der arteriovenösen Druckdifferenz herangezogen. Die arteriovenöse Druckdifferenz ist ein Maß für die Organperfusion [7].

Nach dem Ohm'schen Gesetz sind die Determinanten des arteriellen Blutdrucks das Herzzeitvolumen (HZV) und der systemvaskuläre Widerstand (SVR) [8] – siehe Infobox 2.

arteriovenöse Druckdifferenz:  $\Delta P = MAP - ZVD$   
 Gefäßwiderstand:  $SVR = (MAP - ZVD) / HZV \times 79,9^*$

Infobox 2 – nach [8]

Die physiologische Abnahme der Gefäßcompliance des Gefäßsystems von proximal nach distal verursacht zusammen mit der Abnahme der Gefäßdurchmesser (die Folge ist eine Zunahme der

Legende Infobox 2:  $\Delta P$ : Druckamplitude, MAP: mittlerer arterieller Blutdruck, ZVD: zentralvenöser Druck, SVR: systemvaskulärer Widerstand, HZV: Herzzeitvolumen, \*: der Faktor 79,9 ergibt sich durch Umrechnung der Dimensionen

Pulswellengeschwindigkeit und Pulswellenüberlagerungen durch Reflexion) eine physiologische systolische Amplitudenüberhöhung mit Zunahme der Pulsdruckamplitude in den peripheren Gefäßabschnitten. Dies führt zur Zunahme des systolischen Blutdrucks bei gleichzeitiger Abnahme des mittleren arteriellen und diastolischen Blutdrucks an den distalen Extremitäten – vergleiche Abbildung 3.

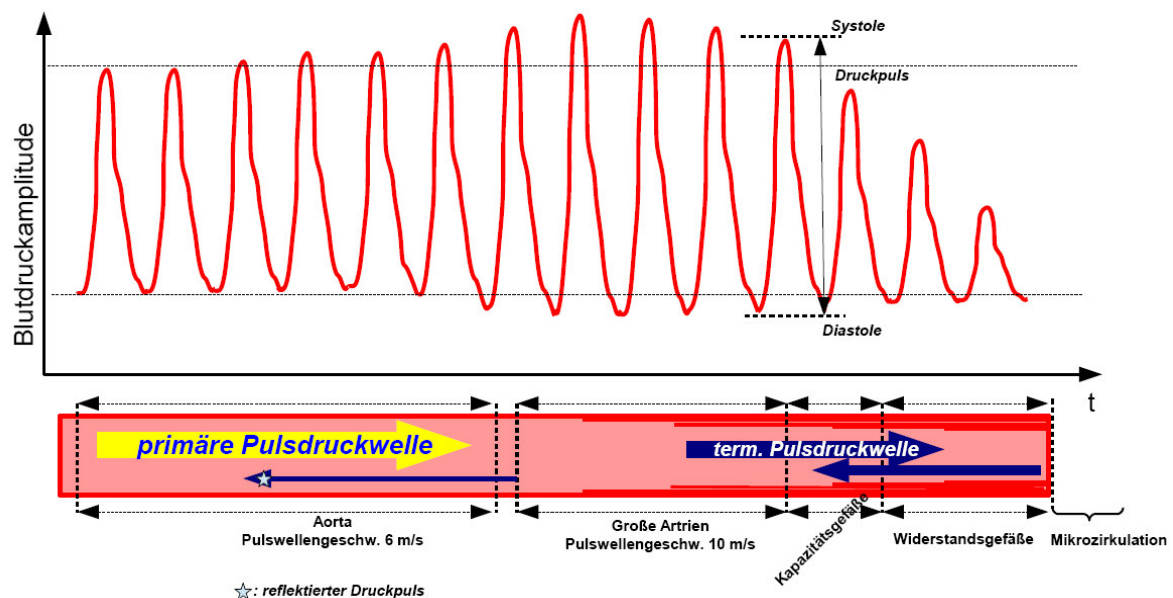


Abbildung 3: Abnahme der Gefäßcompliance, der Gefäßdurchmesser und dadurch bedingte Zunahme der Pulswellenreflexion führen zu systolischer Amplitudenüberhöhung mit Abnahme des diastolischen und mittleren arteriellen Blutdrucks in der Gefäßperipherie (Quelle: modifiziert nach [7])

Bei der Auswahl des Messortes zur nichtinvasiven Blutdruckmessung muss das Pulswellenverhalten im arteriellen Gefäßsystem und damit die Modulation des arteriellen Blutdrucks berücksichtigt und Messergebnisse entsprechend interpretiert werden. Wird zum Beispiel am Unterschenkel (Musculus gastrocnemius) eines gesunden Probanden in Rückenlage der Blutdruck bestimmt, muss ein im Vergleich zur Oberarm-Messung physiologisch erhöhter systolischer Blutdruckwert erwartet werden. Der diastolische Blutdruckwert wird dagegen niedriger bestimmt werden, als der korrespondierende Messwert am Oberarm.

### 1.3 Determinanten der Organperfusion

Für den aeroben Zellstoffwechsel der Organe ist eine uneingeschränkte Sauerstoffversorgung erforderlich. Das Sauerstoffangebot ( $\text{DO}_2$ ) am Zielorgan hängt dabei von mehreren Faktoren ab. Maßgeblich ist das Blutvolumen, das pro Zeiteinheit ein Organ durchströmt und damit den an das Hämoglobin gebundenen Sauerstoff zur Verfügung stellen kann. Das Herzzeitvolumen

und der arterielle Sauerstoffgehalt sind die Basisgrößen, wobei die wesentliche Determinante für das globale Sauerstoffangebot das Herzzeitvolumen (HZV) darstellt [9].

$$\text{HZV} = \text{MAP} / \text{SVR}$$

$$\text{DO}_2 = \text{HZV} \times \text{CaO}_2$$

$$\text{CaO}_2 = (\text{P}_{\text{atm}} - \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}) \times \text{FiO}_2 \times 0,03^{\#} + \text{Hb} \times \text{SaO}_2 \times 1,34^*$$

$$\text{PP} = \text{R} \times \text{Q} \text{ (Gesetz n. Darcy)}$$

Infobox 3 - Quelle: nach [10]

Das HZV ist, wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, jedoch eine abhängige Variable und steht in Wechselwirkung mit dem systemvaskulären Widerstand (SVR) und dem MAP. Die Determinante für die regionale Organperfusion und damit

individuelle Sauerstoffversorgung eines Organs ist der Organ-Perfusionsdruck (PP). Dieser definiert in Abhängigkeit des Widerstandes (R) den Fluss (Q) durch ein Organ entsprechend dem Gesetz nach Darcy [9] – vergleiche Infobox 3.

Der regionale Perfusionsdruck resultiert aus dem Druckgradienten zwischen dem Druck im zuführenden und abführenden Gefäßsystem des jeweiligen Organs, also im Idealfall der Differenz zwischen dem MAP und dem zentralen Venendruck (ZVD). Aber der individuelle Organ-Perfusionsdruck kann erheblich niedriger als der Druckgradient zwischen dem systemischen mittleren arteriellen Druck und dem zentralvenösen Venendruck ausfallen. Dies ist zum einen der Fall, wenn in den zuführenden Gefäßen zum Beispiel durch Stenosen oder Shunts ein vorgeschalteter Druckgradient auftritt oder der Druck im abfließenden Gefäßbett, der sogenannte „Downstream-Pressure“ des Organs, durch venösen Rückstau erhöht ist. Folglich reduziert sich der Netto-Perfusionsdruck dadurch entsprechend - vergleiche Abbildung 4.

---

Legende Infobox 3: DO<sub>2</sub>: Sauerstoffangebot, HZV: Herzzeitvolumen, MAP: mittlerer arterieller Blutdruck, SVR: systemvaskulärer Widerstand, CaO<sub>2</sub>: Sauerstoffgehalt (arterial oxygen content), P<sub>atm</sub>: Luftdruck; P<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: Wasserdampfdruck, FiO<sub>2</sub>: inspiratorische Sauerstofffraktion, Hb: Hämoglobin; SaO<sub>2</sub>: arterielle Sauerstoffsättigung, #: Bunsenlöslichkeitskoeffizient für Sauerstoff, \*: Hüfner-Zahl; PP: Perfusionsdruck; R: Widerstand, Q: Fluss

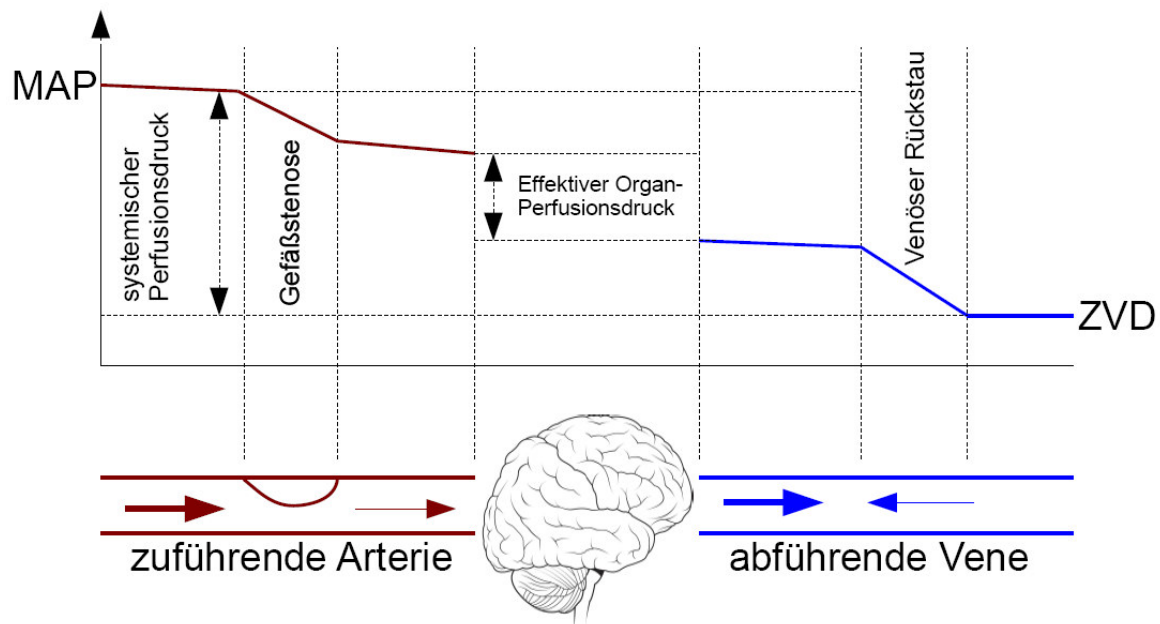


Abbildung 4: Organperfusion. Der effektive Perfusionsdruck eines Organs fällt durch einen vorgeschalteten Druckgradienten und / oder durch Anhebung des Down-Stream-Pressure geringer aus, als der systemische Druckgradient, definiert durch den mittleren arteriellen Blutdruck (MAP) und den zentralvenösen Druck (ZVD) (Quelle: eigene Darstellung)

Der Organperfusionsdruck ist somit unmittelbar abhängig vom MAP. Deswegen kommt dem MAP eine entscheidende physiologische Bedeutung als Surrogatparameter für die Sauerstoffversorgung der Organe zu.

Das Herzzeitvolumen ist ein wichtiger Faktor für das globale Sauerstoffangebot im menschlichen Organismus, aber alleine betrachtet kein Garant für eine ausreichende regionale Sauerstoffversorgung der Organe. Auch bei hochnormalem Herzzeitvolumen kann nämlich die Organperfusion kritisch gestört sein, wenn der systemvaskuläre Widerstand und damit der mittlere arterielle Blutdruck entsprechend zu niedrig sind. Dies ist zum Beispiel im distributiven Schock (Sepsis, spinale Läsion) der Fall und spiegelt sich in einer insuffizienten Laktat-Clearance wieder.

Somit ist der MAP eine entscheidende Determinante für die Organperfusion und einfach zu erheben. Er ist daher ein unverzichtbarer Basisparameter im Rahmen des anästhesiologischen Monitorings.

#### **1.4 Der perioperative Patientenblutdruck – ein unabhängiger Morbiditätsfaktor**

Der arterielle Blutdruck ist ein anerkannter, unabhängiger Risikofaktor für kardiovaskuläre Erkrankungen [11]. Insbesondere die chronische arterielle Hypertonie stellt einen der wichtigsten modifizierbaren Risikofaktoren für den cerebralen Insult, den Herzinfarkt, die Herzinsuffizienz und die periphere arterielle Verschlusskrankheit dar [12].

Aber nicht nur in der langfristigen Betrachtung ist der Blutdruck ein unabhängiger Risikofaktor für den betroffenen Patienten. Auch in der perioperativen Phase hat die Höhe des Patienten-Blutdrucks einen signifikanten Einfluss auf die Krankenhaus-Morbidität und -Mortalität. Neben der Ausprägung der perioperativen Hypotonie oder Hypertonie spielt dabei auch die Dauer des Ereignisses eine Rolle. Die Relevanz einer intraoperativen hämodynamischen Instabilität wurde in der Vergangenheit mehrfach belegt:

Monk et al. konnten in einer prospektiven Beobachtungsstudie an 1064 Patienten die intraoperative Hypotonie neben dem Einfluss der Komorbidität unter den drei wichtigsten unabhängigen Prädiktoren für eine erhöhte postoperative Ein-Jahres-Mortalität identifizieren [13]. Eine systolische Hypotonie, definiert ab einem Wert  $< 80$  mmHg unter Allgemeinanästhesie, erhöhte pro Minute Dauer die Ein-Jahres Mortalität um den Faktor 1,036.

Die Arbeit von Reich et al. zeigt auf, dass Patienten, die in der Narkoseeinleitungsphase (0 – 10 min nach Induktion) eine arterielle Hypotonie erlitten, häufiger morbiditätsbedingt eine verlängerte Krankenhausverweildauer aufwiesen oder während des Aufenthaltes verstarben als Patienten ohne Hypotonieereignis. Eine hypotone Phase wurde bei Reich et al. entweder mit der Bedingung eines MAP  $< 40$  % des Ausgangswertes und dem gleichzeitigen Unterschreiten eines MAP von 70 mmHg oder eines MAP kleiner 60 mmHg definiert [15].

In einer weiteren Studie von Reich et al. wurde ein Zusammenhang zwischen einer Operationszeit größer 220 Minuten und hämodynamischen Veränderungen mit negativem chirurgischem Outcome (NSO) hergestellt. Insbesondere ein intraoperativ gemessener zu hoher systolischer Blutdruck, definiert ab einem SAP  $> 160$  mmHg, war ein unabhängiger Risikofaktor für eine morbiditätsbedingte verlängerte Krankenhaus-Verweilzeit oder eine erhöhte postoperative Mortalität. Ebenso war dies für einen erniedrigten MAP  $< 55$  mmHg der Fall [16].

In der Arbeit von Charlsson et al. hatten Patienten mit vorbestehender arterieller Hypertonie und Diabetes mellitus - in Abhängigkeit von intraoperativen hämodynamischen Veränderungen - ein erhöhtes Risiko für postoperative kardiale Ereignisse oder ein renales

Versagen. Durch Rechtsverschiebung der Autoregulationskurve bei der chronischen arteriellen Hypertonie kann für diese Patienten bereits eine kritische Organperfusion vorliegen, wenn der MAP während einer Allgemeinanästhesie in einem für Blutdruckgesunde noch normalen Bereich liegt.

Charlsson et al. zeigen weiterhin, dass das Risiko am größten war, wenn der mittlere arterielle Druck (MAP) um mehr als 20 mmHg vom präoperativen Ausgangswert anstieg oder abfiel [17, 18]. Relative Veränderungen des MAP in einer Größenordnung von 20 % des präoperativen MAP lieferten näherungsweise identische Ergebnisse [17]. Die kumulierte Häufigkeit [%] der postoperativen ischämischen kardialen Komplikationen war dabei abhängig von der Dauer (t) der intraoperativen Hypotension ( t = 5-59 min. 24% vs. t > 60 min. 95%).

Kheterpal et al. untersuchten Patienten, die sich einem allgemeinchirurgischen, gefäßchirurgischen oder urologischen Eingriff unterziehen mussten, auf unabhängige Prädiktoren für ein postoperatives kardiales Ereignis (plötzlicher Herztod, NSTEMI, neue klinisch signifikante kardiale Arrhythmie). Unter neun Prädiktoren ließ sich die präoperativ bestehende arterielle Hypertonie als unabhängiger Risikofaktor identifizieren. In der Studie hatten Hochrisiko-Patienten für ein postoperatives kardiales Ereignis intraoperativ häufiger einen MAP unter 50 mmHg oder einen relativen Abfall des MAP vom präoperativen Wert um mehr als 40 % [14].

Trotz der großen Zahl an klinischen retrospektiven und prospektiven Untersuchungen existiert zum jetzigen Zeitpunkt keine evidenzbasierte Interventionsschwelle zur Behandlung der intraoperativen Hypotension. In einer Übersichtsarbeit empfehlen die Autoren um Weyland et al. den MAP als Interventions-Trigger zu verwenden. Der systolische Blutdruck ist wegen der Altersabhängigkeit des Pulsdrucks aufgrund abnehmender Gefäß-Compliance und aus physiologischen Überlegungen dem MAP als Interventions-Trigger unterlegen.

Patienten ohne kardiovaskuläre Risikofaktoren sollen demnach ab einem MAP < 60 mmHg behandelt werden, bei Hypertonikern wird die Interventionsgrenze erreicht, wenn der präoperative MAP um mehr als 30 % abfällt [9]. Aus oben genannten klinischen Studien ist eine Zeitabhängigkeit zwischen der Hypotoniedauer und dem erhöhten postoperativen Risiko abzuleiten. Eine länger andauernde Hypotonie muss daher eine höhere Interventionsschwelle des MAP zur Folge haben.

Wie gezeigt, ist der Patientenblutdruck sowohl langfristig als auch in der kurzfristigen perioperativen Phase ein unabhängiger Risikofaktor für eine erhöhte peri- und postoperative Morbidität und Mortalität. Für die langfristige Einstellung des Patientenblutdrucks werden dem behandelnden Arzt evidente Leitlinien mit klar definierten Blutdruckgrenzwerten an die Hand gelegt [11]. Konsensus-Leitlinien für die perioperative, kurzfristige Therapie des Blutdrucks oder definierte Blutdruckgrenzwerte existieren bis jetzt jedoch nicht.

In der perioperativen Phase ist der Patient aber vor allem durch eine arterielle Hypotonie gefährdet. Trotz etabliertem, lückenlosem Anästhesiemonitoring wird sie auch heute nicht immer zeitnah erfasst und eine Intervention zur hämodynamischen Stabilisierung damit unterlassen. Die Definition einer intraoperativen Hypotension erweist sich deshalb als schwierig.

### **1.5 Intraoperative Hypotension**

In der Literatur schwankt die Inzidenz der intra- und perioperativen Hypotension erheblich. Neben dem unterschiedlichen anästhesiologischen Management und Patientenkollektiv ist die Ursache vor allem in der uneinheitlichen Definition der intraoperativen Hypotonie begründet [9]. Es werden nicht nur Absolutwerte, sondern auch relative Blutdruckveränderungen in Prozent vom Ausgangswert als Grenzwerte für eine notwendige Vasopressor- oder Inotropikatherapie herangezogen. Bijker et. al fanden in einer Metaanalyse von 130 Studien mit 15509 erwachsenen Patienten insgesamt 140 verschiedene Definitionen der intraoperativen Hypotension [19]. Die drei am häufigsten verwendeten Definitionen waren ein systolischer Blutdruck unter 80 mmHg, ein Abfall des systolischen Blutdruckes um mehr als 20 % vom Ausgangswert oder ein systolischer Blutdruckwert unter 100 mmHg oder kleiner 30 % des Ausgangswertes. In Abhängigkeit der angewendeten Definition ergaben sich Inzidenzen der intraoperativen Hypotension zwischen 5 und 99 %. Seeling et al. wendeten die drei häufigsten Definitionen der intraoperativen Hypotension (SAP < 80 mmHg, SAP-Abfall > 20 % der Baseline, SAP < 100 mmHg oder SAP-Abfall > 30 % der Baseline) an 1273 Patienten an. Es resultierten Inzidenzen der intraoperativen Hypotension zwischen 17,6 und 74,4% [20]. Aufgrund der uneinheitlichen Definition einer intraoperativen arteriellen Hypotension unter Allgemeinanästhesie kann das rechtzeitige Erkennen einer notwendigen Kreislauftherapie problematisch sein. Ziel dabei ist jedoch eine Senkung der perioperativen Morbidität und Mortalität.



### **1.5.1 Risikofaktoren und Prädiktoren einer Hypotension unter Allgemeinanästhesie**

Die arterielle Hypotension nach Induktion einer Allgemeinanästhesie ist eine regelmäßige Nebenwirkung dieses Narkoseverfahrens.

Anhand multivariater logistischer Regressionsanalysen konnten Prädiktoren für den individuellen Patienten festgelegt werden, die mit einem erhöhten Risiko für eine intraoperative Hypotension einhergehen.

Reich et al. identifizierten neben dem ASA-Status (III-V), dem Alter ( $\geq 50$  Jahre), einem MAP-Ausgangsblutdruck kleiner 70 mmHg auch eine signifikante Abhängigkeit vom verwendeten Induktions-Medikament. Der Einsatz von Propofol und dosisabhängig von Fentanyl sind ebenfalls Prädiktoren der intraoperativen Hypotension [15]. Dies deckt sich mit der Arbeit von Weyland et. al [9]. Hier wurde zusätzlich ein Zusammenhang zwischen der Operationszeit ( $> 6$  h im Vergleich zu einem Kurzeingriff  $< 15$  min) und kombinierter Anästhesieverfahren (Allgemein- und Regionalanästhesie) mit intraoperativer Hypotension hergeleitet. Siehe dazu Tabelle 1.

Prädiktoren einer arteriellen Hypotonie unter Allgemeinanästhesie	
	odds ratio
ASA-Klassifikation (III-V vs. I-II)	1,55
Alter ( $\geq 50$ Jahre)	2,25
mittlerer arterieller Blutdruck, präoperativ (MAP $< 70$ mmHg)	5,0
Propofol vs. Etomidat und Thiopental	3,94
Fentanyl mit steigender Dosierung	1,32
Operationsdauer ( $> 6$ h vs. 15 min)	10,6
kombinierte Regional - und Allgemeinanästhesie vs. Mono – Allgemeinanästhesie	1,7

Tabelle 1: Prädiktoren einer arteriellen Hypotonie unter Allgemeinanästhesie; Quelle: nach [9, 15]

### **1.5.2 Hämodynamische Auswirkungen der Allgemeinanästhesie**

Nach Narkoseinduktion treten die meisten Episoden einer intraoperativen Hypotension in den ersten 10 Minuten auf [15, 21]. Die Narkoseeinleitung stellt damit eine kritische Phase in Bezug auf die hämodynamische Stabilität des Patienten dar.

Die Ursache der intraoperativen Hypotension unterliegt multifaktoriellen Einflüssen durch die Induktionshypnotika, den Komorbiditäten, dem Hydrierungszustand und der Prämedikation der Patienten und schließlich dem chirurgischen Eingriff selbst.

Die in der Anästhesie etablierten intravenösen Hypnotika wirken alle mehr oder minder kreislaufdepressiv. Propofol verursacht durch seine sympatholytische Wirkung mit verminderter Noradrenalinfreisetzung in Abhängigkeit von der Dosis, der Injektionsgeschwindigkeit und dem Alter des Patienten einen Abfall des MAP um 30 bis 40% vom Ausgangswert. Dabei sinken das Herzzeitvolumen und der systemvaskuläre Widerstand um jeweils 15% [22].

Sevofluran zeigt gegenüber Propofol intraoperativ ein stabileres Kreislaufverhalten [23].

Opioide haben insgesamt eine geringere Auswirkung auf das kardiovaskuläre System. Es kann jedoch zur Abnahme des arteriellen Blutdrucks vornehmlich durch arterioläre Vasodilatation kommen. Ursächlich ist eine Dämpfung der Vasomotorenzentren in der Medulla oblongata [24]. Auch eine Histaminliberation, zum Beispiel durch Morphin, kann den systemvaskulären Widerstand senken. Des Weiteren kann die Aktivierung kardioinhibitorischer vagaler und die gleichzeitige Hemmung sympathischer Efferenzen durch Opioide eine negativ chronotrope Wirkung verursachen. Dies ist vor allem bei Alfentanil und Remifentanil von Bedeutung [24].

Auch während der Aufrechterhaltung einer Allgemeinanästhesie ist der Patient aus verschiedenen Ursachen gefährdet, eine Hypotension zu erleiden. Einerseits durch eine Reduktion des systemvaskulären Widerstandes, andererseits durch eine Abnahme der kardialen Vorlast mit konsekutiver Reduktion des Herzzeitvolumens. Verantwortlich dafür sind eine relevante Hypovolämie oder direkte negative inotrope Effekte.

Regionalanästhesieverfahren in Kombination mit einer Allgemeinanästhesie führen regelmäßig zur Abnahme des Tonus der glatten Gefäßmuskulatur durch passagere Sympathikolyse mit konsekutiver Abnahme des systemvaskulären Widerstandes. Große intraabdominelle Eingriffe mit Mobilisation des Darmes verursachen ein Eventrationssyndrom mit Freisetzung vasoaktiver Prostaglandine. Diese führen ihrerseits zu einer Abnahme des Gefäßtonus und damit Reduktion des systemvaskulären Widerstandes.

Patienten mit einem septischen Krankheitsbild leiden ebenfalls mediatorvermittelt unter einem Verlust des systemvaskulären Widerstandes.

Außerdem kann der Volumenstatus des Patienten prä- oder intraoperativ gestört sein. Dies bedingt wiederum eine Abnahme der kardialen Vorlast und des Herzzeitvolumens.

Flüssigkeits- bzw. Volumenmangel durch intraoperativen Blutverlust, Volumendepletion bei Ileus, Sepsis oder eine Dehydratation durch eine chronische Diarrhoe sind dafür ursächlich. Auch eine präoperativ durchgeführte Dialyse oder eine forcierte Diuretikatherapie bei herzinsuffizienten Patienten kann das intravasale Volumen kreislaufwirksam reduzieren.

Die Beatmung mit positiv endexpiratorischem Druck (PEEP) kann einen Einfluss auf die kardiale Vorlast und das Herzzeitvolumen haben, insbesondere wenn der Patient bereits durch eine hypovoläme Kreislauftsituation gefährdet ist.

Lagerungsbedingt kann eine Hypotonie durch passive Volumenverschiebung insbesondere bei der Antitrendelenburg- und Beachchair- Lagerung, zum Beispiel bei Oberbauch- oder neurochirurgischen Eingriffen, auftreten.

Nicht zuletzt ist auch die medikamentöse Prämedikation des Patienten mit für das intraoperative Kreislaufverhalten verantwortlich. Insbesondere Antihypertensiva, Diuretika und Beta-Rezeptorenblocker zeichnen für eine kreislaufdepressive Wirkung verantwortlich [7].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die intraoperative Hypotension im Rahmen einer Allgemeinanästhesie regelmäßig zu beobachten und multifaktoriell verursacht ist. Die akkurate Blutdruckmessung ist Voraussetzung um eine drohende Hypotension zeitgerecht zu erkennen und damit das Patientenoutcome bezüglich Morbidität und Mortalität positiv zu beeinflussen.

## 1.6 Die nichtinvasive Blutdruckmessung – Möglichkeiten und Grenzen

Der italienische Arzt Scipione Riva-Rocci beschrieb 1896 eine Methode, anhand der sich mit Hilfe einer pneumatischen Armmanschette und einem Quecksilbermanometer der systolische Blutdruck am Oberarm durch gleichzeitige Palpation der Arterie distal der Manschette bestimmen ließ [25]. Bereits 1901 erkannte von Recklinghausen die Abhängigkeit der korrekten Bestimmung des Blutdrucks von der Größe der verwendeten Blutdruckmanschette [26].

Danach gelang Nikolai Sergejewitsch Korotkoff im Jahre 1905 die differenzierte Bestimmung des menschlichen Blutdrucks mit systolischen und diastolischen Messwerten durch die Beschreibung von Geräuschphänomenen in der Arteria brachialis – der nach ihm benannten „Korotkoff-Geräusche“ [27]. Die Brachialarterie wird durch das Aufblasen einer am Oberarm angebrachten pneumatischen Manschette okkludiert, sobald der Manschettendruck den systolischen Blutdruck im Blutgefäß überschreitet. Durch sukzessives Absenken des Manschettendrucks entsteht im Gefäß der Arteria brachialis ein sich verändernder pulsatiler Blutfluss. Ist der Manschettendruck kleiner als der systolische aber größer als der diastolische Blutdruck, so kommt es zu einem zyklischen, pulssynchronen Eröffnen und Wiederverschließen der Arterie, bis der diastolische Blutdruck unterschritten ist. Dann stellt sich ein kontinuierlicher Blutfluss im Gefäß ein. Dieses zyklische Öffnen und Schließen des Gefäßes wird von charakteristischen Geräuschen, die über ein Stethoskop auskultierbar sind, begleitet. Die Geräusche werden klassischerweise in fünf Phasen eingeteilt [3] – vergleiche Infobox 4.

Korotkoff-Geräusche	
Phase I	erstmaliges erscheinen eines klaren, klopfenden Geräusches
Phase II	Geräusch wird weicher und länger
Phase III	Geräusch wird schärfer und lauter
Phase IV	Geräusch wird gedämpfter und weicher
Phase V	Geräusch verschwindet vollständig.

Infobox 4 – Quelle: nach [3]

Ein turbulenter Blutfluss im arteriellen Blutgefäß und Oszillationen der Gefäßwand sollen für die Geräuschphänomene verantwortlich sein [3]. Der Beginn der Phase I korrespondiert dabei mit dem systolischen Blutdruck, unterschätzt diesen aber tendenziell im Vergleich mit einer direkten intra-arteriellen Blutdruckmessung. Die Phase V

korrespondiert mit dem diastolischen Blutdruck [28]. Eine visualisierte Darstellung der Korotkoff-Geräusche und ihre Zuordnung zum entsprechenden Blutdruck zeigt Abbildung 5.

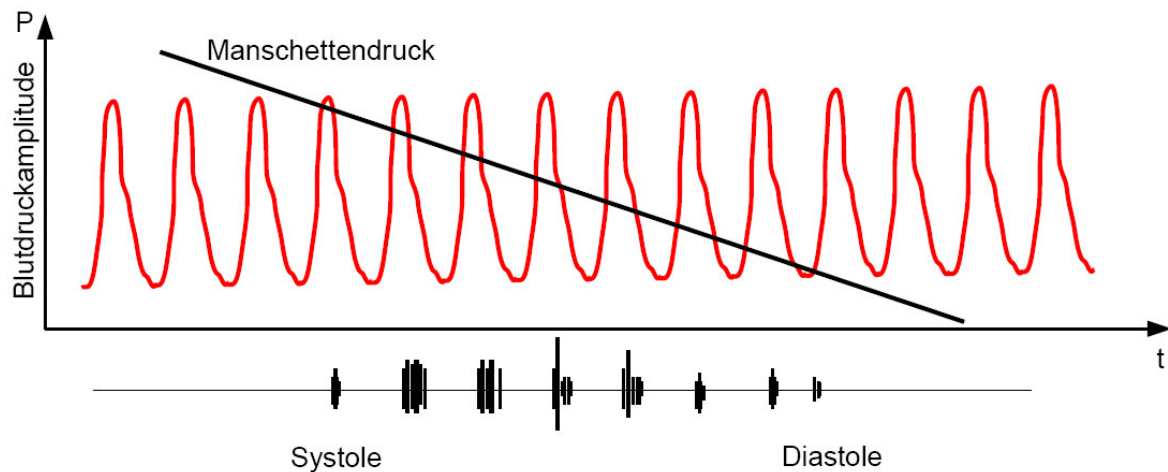


Abbildung 5: Die auskultatorische Blutdruckmessung nach Korotkoff (Quelle: modifiziert nach [7])

Das Quecksilber-Sphygmomanometer ist der historische Goldstandard der nichtinvasiven arteriellen Blutdruckmessung [3]. Zum jetzigen Zeitpunkt ist dieses Verfahren weltweit als Standard der nichtinvasiven Blutdruckmessung etabliert. Seine hohe Messgenauigkeit, die geringe Variabilität der Messergebnisse von Geräten unterschiedlicher Hersteller, sowie die einfache „Null-Kalibration“ sind die Vorteile dieses Messverfahrens [29]. Nichtinvasiv messende Blutdruckmessgeräte neuerer Generation werden gegen die Quecksilber-Sphygmomanometrie validiert [30]. Es zeichnet sich aber ein Trend zu alternativen Messgeräten ab.

Ursachen dafür sind der restriktive Umgang mit quecksilberhaltigen Geräten in der Medizin, vor allem im europäischen Raum, das Vorhandensein alternativer akkurater Blutdruckmessgeräte und der Weggang von der traditionellen auskultatorischen Blutdruckmessmethode [27]. Die nichtinvasive Blutdruckmessung der gegenwärtig eingesetzten Messgeräte folgt entweder dem auskultatorischen Messprinzip nach Korotkoff [31] oder ist automatisiert gemäß dem oszillometrischen Messprinzip [32].

Die oszillometrische Blutdruckmessung hat sich in der Anästhesie, Intensiv- und Notfallmedizin vor allem wegen der Möglichkeit etabliert, auch bei schlechtem Patientenzugang automatisierte Messungen durchzuführen, unabhängig vom Umgebungslärm. Außerdem können je nach Gerät Alarmgrenzen zur Blutdrucküberwachung festgelegt werden [33, 34, 35].

### **1.6.1 Das oszillometrische Messprinzip**

Die Erstbeschreibung des oszillometrischen Blutdruckmessverfahrens erfolgte durch Marey im Jahre 1876 [36]. Er benutzte ein flüssigkeitsgefülltes Behältnis, das den Arm umschloss. Bei Zunahme des Flüssigkeitsdruckes war auch eine Zunahme von Druckschwingungen im Behältnis bis zu einer maximalen Ausprägung zu registrieren, gefolgt von einer Abnahme der Schwingungen.

Die experimentelle Grundlage der Messtechnik bereiteten schließlich im zwanzigsten Jahrhundert Posey, Ramsey und Geddes. Sie konstatierten in ihren Arbeiten, dass der mittlere Manschettendruck, der mit einer maximalen Manschettenoszillation einhergeht, ungefähr dem MAP entspricht [37].

Die moderne oszillometrische Sphygmomanometrie verwendet eine pneumatische Manschette, die zur Blutdruckmessung an einer Extremität, zum Beispiel dem Oberarm des Patienten, angebracht wird. Dabei wird die Manschette dann bis zu einem Druck aufgeblasen, der oberhalb des systolischen Blutdrucks des Patienten liegt. Der Manschettendruck wird anschließend langsam stufenweise oder kontinuierlich abgelassen. Der Drucksensor im Gerät ist dabei so sensibel konzipiert, dass er neben dem tatsächlichen Manschettendruck auch kleinste Druckschwankungen in der Manschette, hervorgerufen durch den Herzschlag des Patienten, registriert. Mit jedem Herzschlag kommt es zu einer Blutvolumenänderung in der Arterie, die wiederum zu einer Druckänderung in der umgebenden luftgefüllten Manschette führt [38]. Der Drucksensor erzeugt ein elektrisches Signal, das zum einen den Manschettendruck wiedergibt und zum anderen von pulssynchronen Schwingungen mit variabler Amplitude überlagert ist.

Ist der Manschettendruck größer als der systolische Blutdruck, weisen die Manschettenoszillationen eine minimale Amplitude auf. Mit fallendem Druck in der Manschette nimmt die Oszillations-Amplitude bis zu einem Maximum zu. Bei weiter abnehmendem Manschettendruck werden die Schwingungsamplituden sukzessive kleiner bis sie wiederum ein Minimum erreichen [38]. Sie können vom Gerät gefiltert separat dargestellt und von einer Hüllkurve umgeben werden. Diese hat in etwa die Form einer Glocke – vergleiche Abbildung 5.

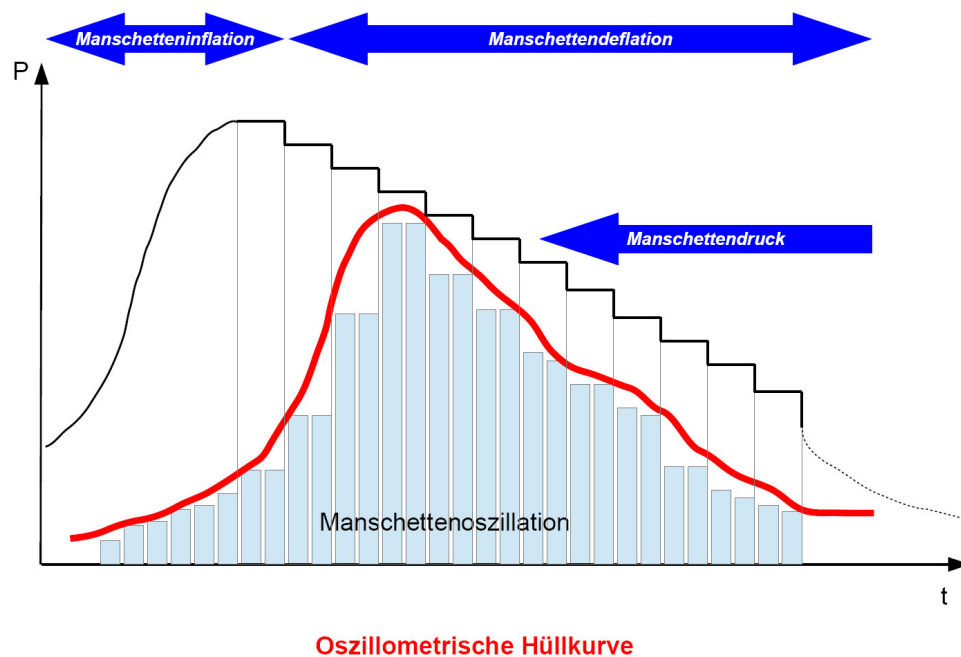


Abbildung 6: Das oszillometrische Messprinzip (Quelle: modifiziert nach [39])

Physiologischerweise entspricht der Manschettendruck, bei dem eine maximale Puls-Oszillation in der Manschette registriert werden kann, dem MAP.

Das Manschettendruck-Äquivalent der Schwingungsamplituden auf der Hüllkurve für den systolischen und diastolischen Blutdruck steht in einem festen Verhältnis zur maximalen Schwingungsamplitude. Dieses charakteristische Verhältnis ist jedoch nicht eindeutig definiert [40] und eine rationale physikalische Erklärung für ein bestimmtes Verhältnis der Systole/Diastole-Amplitude zur maximalen Oszillationsamplitude des MAP fehlt bis heute [37, 40]. Babbs et al. legen den systolischen Wert bei einem Manschettendruck im aufsteigenden Teil der Hüllkurve fest, wo die Schwingungsamplitude 50 % der maximalen Schwingungsamplitude beträgt. Der diastolische Wert findet sich entsprechend im absteigenden Teil der Hüllkurve bei einer Oszillationsamplitude, die 70 % der maximalen Schwingungsausprägung ausmacht [40] – vergleiche Abbildung 7.

In der Arbeit von Kolluri et al. wird hingegen ein Amplitudenverhältnis für den systolischen und diastolischen Blutdruck in einem Bereich von 40 - 80 % der maximalen Amplitudenschwingung angegeben [38].

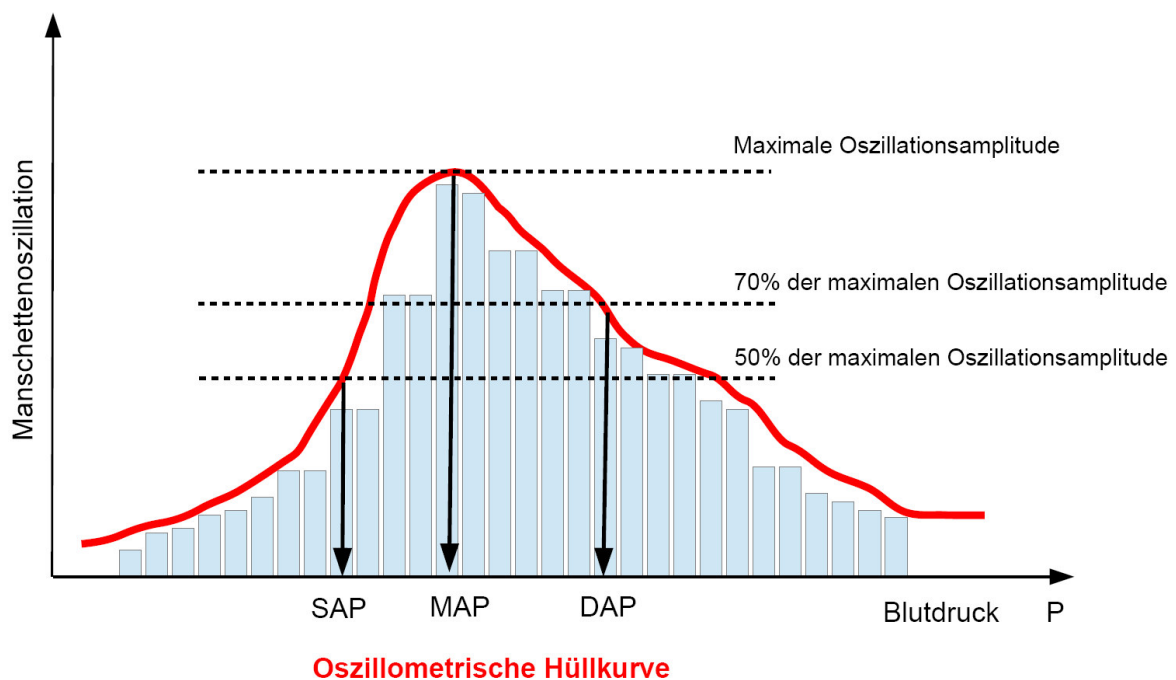


Abbildung 7: Charakteristisches Systolen- und Diastolen-Amplituden-Verhältnis (SAP = systolischer Blutdruck, MAP = mittlerer arterieller Blutdruck, DAP = diastolischer Blutdruck; Quelle: modifiziert nach [39])

Die den kommerziellen Blutdruckmessgeräten zugrunde liegenden Algorithmen sind Hersteller abhängig und werden von den Firmen unter Verschluss gehalten, weil sie für die Messgenauigkeit der oszillometrischen Blutdruckmessung maßgeblich verantwortlich sind („Maximum amplitude pressure algorithm“) [3, 29, 41].

Zur Berechnung eines charakteristischen Amplitudenverhältnisses und der daraus folgenden Festlegung des systolischen und diastolischen Blutdruck-Wertes werden verschiedene Einflüsse auf die Drucktransmission des Pulsdruckes von der Gefäßwand bis zur Manschette berücksichtigt. Die Aufnahme des Oszillationsmusters hängt signifikant von der anatomischen Position, Elastizität und Größe der betroffenen Arterie ab. Das Ausmaß, die histoanatomische Zusammensetzung und die Verteilung des umliegenden Gewebes sind außerdem ausschlaggebend. Änderungen der vaskulären Wandelastizität sowie arteriosklerotische Gefäßveränderungen spielen zusätzlich eine Rolle. Schließlich sind auch die Größe und das Material der Blutdruckmanschette selbst maßgeblich [29].

Einflüsse durch Umgebungsgeräusche auf das Messergebnis spielen im Gegensatz zur auskultatorischen Messmethode nach Korotkoff keine Rolle. Diese Eigenschaft macht das oszillometrische Messverfahren gerade auch in der Notfallmedizin interessant. Mechanische Erschütterungen oder äußere Schwingungen wie sie zum Beispiel in bodengebundenen oder



luftgestützten Rettungsmitteln auftreten, können das Oszillationsignal am Drucksensor des Messgerätes jedoch beeinflussen.

Zusammengefasst werden kann hier, dass neben dem zugrunde liegenden Algorithmus, die Qualität des verwendeten Drucksensors, sowie physioanatomische und technische Einflussfaktoren für die Messgenauigkeit eines oszillometrischen Blutdruckmessgerätes verantwortlich sind.

Die enorme Bedeutung der exakten Blutdruckbestimmung wird von Ritter et al. im Zusammenhang mit der chronischen arteriellen Hypertonie anhand eines exemplarischen Rechenbeispiels dargelegt. Grundlage dafür sind die von der Deutschen Hochdruckliga definierten Grenzwerte für den arteriellen Blutdruck, die den Beginn einer Blutdrucktherapie definieren.

Eine Blutdruckmessung mit einem systematischen Messfehler um 5 mmHg führt konsekutiv zu einer unnötigen Behandlung von Patienten, bei denen falsch hohe Blutdruckwerte gemessen werden und zur Unterlassung einer antihypertensiven Therapie bei Patienten mit falsch niedrig gemessenen Blutdruckwerten. Nach Daten aus den USA führt dies bei Überbehandlung zu Mehrausgaben im Gesundheitswesen von 27 Milliarden Dollar, bei unterlassener antihypertensiver Therapie zu 25.000 tödlichen Herzinfarkten und ebenso vielen behindernden Schlaganfällen innerhalb eines 6 Jahres Zeitraumes – vgl. dazu [12].

Den exakten systolischen und diastolischen Blutdruckwert aus Manschetten-Oszillationen zu bestimmen, bleibt aber bis jetzt ein ungelöstes wissenschaftliches Problem [40].

### **1.6.2 Einflussgrößen auf die oszillometrische Blutdruckmessung**

Neben verfahrensimmanenten Ungenauigkeiten bei der oszillometrischen Blutdruckmessung sind weitere Einflüsse auf das Messergebnis zu beachten. Besonders die Manschettengröße und die Manschettenlokalisation [1].

#### **1.6.2.1 Die Blutdruckmanschettengröße**

Die Abmessungen der jeweils verwendeten pneumatischen Manschette, genauer die Abmessungen der Gummiblase in der Manschettenhülle, wirken sich auf das Ergebnis der Blutdruckmessung aus. Wie oben angesprochen, erkannte von Recklinghausen diese Abhängigkeit bereits im Jahre 1901 [26]. Eine Blutdruckmanschette, die relativ zum

Oberarmumfang zu schmal gewählt wird, überschätzt den Patientenblutdruck und umgekehrt [41].

Die ideale Manschettengröße weist eine Gummiblasenlänge von 80% und eine Breite von 40% des Oberarmumfanges des Patienten auf [3]. Eine Empfehlung der geeigneten Manschettengröße in Abhängigkeit vom Oberarmumfang der American Heart Association zeigt Tabelle 2.

Eine Arbeitsgruppe um Marks et. al überprüfte die Empfehlung und kam zu dem Ergebnis, dass bei einem Verhältnis Manschettenbreite zu Oberarmumfang von 0,46 das Blutdruckmessergebnis in der gepolten Studienpopulation am genauesten war. Rechnerisch zeigte sich eine logarithmische Abhängigkeit:

$$\text{Manschettenbreite [cm]} = 9,34 \times \log(\text{Oberarmumfang [cm]}) \quad [42].$$

Gerade bei adipösen Patienten ist ein solches Verhältnis von 46% nicht mehr praktikabel, weil mit zunehmendem Oberarmumfang die Manschette eine Breite erreicht, die nicht mehr am Oberarm fixiert werden kann. Die Bedeutung der richtigen Manschettenwahl zeigt die Arbeit von Manning et al. Bei 200 nichtinvasiven Blutdruckmessungen mit vergleichender intraarterieller Messung in einem Lehrkrankenhaus wurde lediglich in 68 % der Fälle die adäquate Manschettengröße gewählt. Zu schmal und zu breit gewählte Manschettengrößen unter- beziehungsweise überschätzten den tatsächlichen Blutdruck in der Größenordnung von 10 – 30 mmHg [43].

Manschettenbezeichnung	Oberarmumfang [cm]	Manschetten-Abmessungen [cm]
small adult	22 - 26	12 x 22
adult	27 - 34	16 x 30
large adult	35 - 44	16 x 36
adult tigh	45 - 52	16 x 42

Tabelle 2: Auswahl der Manschettengröße nach Oberarmumfang nach AHA [3]

### **1.6.2.2 Die Blutdruckmanschetten-Lokalisation**

Die nichtinvasive Blutdruckmessung erfolgt standardmäßig am Oberarm des Patienten [1, 3, 44]. Eine Differenz der gemessenen Blutdruckwerte zwischen den beiden Oberarmen ist in mehreren Studien nachgewiesen worden, ohne einen ursächlichen Zusammenhang mit den Probanden ausmachen zu können [3]. Diese Seitendifferenz beträgt in der Arbeit von Lane et al. jedoch nur bei 20 % der Teilnehmer bis zu 10 mmHg [45]. Eine Blutdruckmessung über der Arteria brachialis als Goldstandard ist aber nicht immer praktikabel und anwendbar.

Zum einen können patientenspezifische Faktoren für die Notwendigkeit eines alternativen Messortes verantwortlich sein. Dazu gehören Dialysepatienten mit Cimino-Shunt, Patienten nach axillärer Lymphadenektomie, Patienten nach Trauma, Verbrennung oder Infektion im Bereich der oberen Extremitäten [46]. Auch bei Patienten nach Amputation der oberen Extremität muss ein alternativer Messort gewählt werden. Die extreme Adipositas per magna kann ebenfalls eine Oberarmblutdruckmessung unmöglich machen [1].

Zum anderen können anästhesiespezifische Faktoren einen alternativen Messort für die Blutdruckmessung bedingen. Bei einer totalen intravenösen Anästhesie (TIVA) ist am Infusionsarm eine Blutdruckmessung zu unterlassen um eine kontinuierliche Infusion des Hypnotikums zu gewährleisten und somit eine mögliche Awareness des Patienten zu vermeiden [22].

Auch die intraoperative Lagerung des Patienten und die Operation an sich können eine Blutdruckmessung abweichend von der Standard-Oberarmmessung erforderlich machen. Bei einer intraoperativen Anlagerung beider Arme, zum Beispiel bei der Thyreoidektomie, kann die Blutdruckmessung am Unterschenkel bei schlechtem Zugang der oberen Extremitäten erfolgen. Das gleiche gilt, wenn im Bereich der oberen Extremitäten operiert werden muss und die kontralaterale Extremität durch einen der oben angeführten Gründe zur Blutdruckmessung nicht herangezogen werden kann.

Bei der perioperativen Patientenüberwachung hat sich die Messung am Unterschenkel als praktikable Alternative bei Unmöglichkeit der Blutdruckmessung am Oberarm bewährt und ist allgemein akzeptiert [1]. Auch in der pädiatrischen Intensivmedizin wird häufig bei besserer Zugänglichkeit der unteren Extremität von der Standardblutdruckmessung am Oberarm abgewichen und die Messung am Unterschenkel nichtinvasiv oszillometrisch durchgeführt [46].

Wie in Abschnitt 1.2 erläutert, variiert der arterielle Blutdruck in seiner Ausprägung im Verlauf des arteriellen Gefäßbaumes aufgrund multifaktorieller Einflüsse. Die Höhe des

systolischen Blutdrucks unterliegt dabei je nach gewähltem Messort der größten Variabilität von allen drei Blutdruckparametern [10].

Obwohl die oszillometrische Blutdruckmessung regelmäßig an vom Oberarm abweichenden Messorten, insbesondere am Unterschenkel verwendet wird, ist die Datenlage bezüglich der Übereinstimmung dieser Messwerte mit denen der Oberarm-Blutdruckmessung nicht eindeutig und zum Teil widersprüchlich [2, 46, 47, 48]. Zudem wurde bis zum jetzigen Zeitpunkt noch keine vergleichende Blutdruckmessung an Probanden und Patienten in Bauchlagerung vorgenommen.

## **2. Fragestellung der Promotionsarbeit**

Die intraoperative Blutdrucküberwachung und die Vermeidung einer Hypotonie sind für das Patientenoutcome von signifikanter Bedeutung. Ein akkurates Blutdruckmessverfahren ist die wesentliche Voraussetzung um eine hämodynamische Instabilität zeitnah zu detektieren.

Mit dieser Arbeit soll die Frage beantwortet werden, ob die nichtinvasive oszillometrische Blutdruckmessung am Unterschenkel den etablierten Standard der Blutdruckmessung am Oberarm gleichwertig ersetzen kann – insbesondere auch bei Bauchlagerung der Studienteilnehmer. Dazu wurden sowohl Probanden ohne Allgemeinanästhesie als auch Patienten in Allgemeinanästhesie untersucht. Ebenso wurde der Einfluss der Lagerung evaluiert.

### **3. Material und Methode**

Nach Zustimmung der örtlichen Ethikkommission konnten 63 Teilnehmer, davon 31 Probanden und 32 Patienten in die Studie eingeschlossen werden.

Das Studienprotokoll wurde sowohl in der Probanden-, als auch in der Patientengruppe identisch zur Anwendung gebracht.

Die Messungen erfolgten im Zeitraum von 13. März 2011 bis 23. November 2011 in der Klinik für Anästhesie und operative Intensivmedizin am Klinikum Passau, Lehrkrankenhaus der Universität Regensburg.

#### **3.1 Probanden**

Die Probanden rekrutierten sich als freiwillige Teilnehmer aus dem Personalpool (ÄrztInnen und PflegerInnen) der beiden anästhesiologisch geführten Intensivstationen und des Zentral-OPs des Klinikums Passau.

Nach schriftlicher Aufklärung und Einwilligung nahmen 31 Personen, davon 20 weibliche und 11 männliche Probanden an der Studie teil.

#### **3.2 Patienten**

Die Patienten entstammten der Klinik für Unfallchirurgie am Klinikum Passau und mussten sich einer elektiven Operation in Allgemeinanästhesie mit der Notwendigkeit der intraoperativen Bauchlagerung unterziehen.

Patienten, bei denen eine simultane nichtinvasive Blutdruckmessung an oberer und unterer Extremität nicht möglich war, wurden von der Studie ausgeschlossen. Dies war insbesondere der Fall bei Dialyse-Patienten mit arteriovenösem Shunt, symptomatischer peripherer arterieller Verschlusskrankheit und nach erfolgter axillärer Lymphadenektomie.

Nach präoperativer schriftlicher Aufklärung und Einwilligung wurden 32 Patienten (17 weiblich und 15 männlich) in die Studie aufgenommen.

### **3.2.1 Allgemeinanästhesie in der Patientengruppe**

Die Prämedikation vor Narkoseeinleitung erfolgte nach Ausschluss von Kontraindikationen standardisiert am Vorabend und am Morgen des Operationstages mit dem Benzodiazepin Dikaliumclorazepat (Tranxilium, Sanofi-Aventis Deutschland GmbH, Frankfurt, Deutschland) in einer Dosierung von 10 – 20 mg per os. Eine bestehende antihypertensive Medikation wurde perioperativ weitergegeben.

Das Anästhesie-Monitoring bestand neben der nichtinvasiven, oszillometrischen Blutdruck-Messung aus einem 3 poligen Elektrokardiogramm, einer Pulsoxymetrie und nach Intubation aus einer endtidalen Kapnometrie unter mechanischer Beatmung.

Zur Narkoseinduktion wurde Fentanyl (Janssen-Cilag GmbH, Neuss, Deutschland) in einer Dosierung von 2-4 µg / kg KG und Propofol in einer Dosierung von 1,5-2,5 mg / kg KG als intravenöser Bolus verabreicht. Nach erfolgreicher Maskenbeatmung wurde der Patient mit Atracurium (Actavis Deutschland GmbH, München, Deutschland) in einer Dosierung von 0,5 – 0,6 mg / kg KG muskelrelaxiert. Die endotracheale Intubation erfolgte mit einem Woodbridge-Tubus der Größe ID 8,0 mm bei Frauen und ID 8,5 mm bei Männern.

Die Narkose wurde als opioidgestützte Anästhesie mit dem volatilen Anästhetikum Sevofluran (Sevorane<sup>®</sup>, Abbott GmbH & Co. KG, Ludwigshafen, Deutschland) in einer Konzentration von ca. 1 MAC, entsprechend 1,8 – 2,2 Vol% und intermittierenden Opioidgaben aufrechterhalten.

Die intraoperative Beatmung wurde volumenkontrolliert und zeitgesteuert durchgeführt (Narkosegerät Primus, Drägerwerk AG & Co, Lübeck, Deutschland). Das adäquate Atemminutenvolumen wurde anhand der endtidalen CO<sub>2</sub>-Messung bestimmt. Es wurde ein Tidalvolumen von 6-8 ml / kg idealem Körpergewicht angestrebt. Der positive endexpiratorische Plateaudruck (PEEP) betrug bei allen Patienten im Mittel 5 mbar (4-7 mbar).

Bei allen Patienten erfolgte der perioperative Flüssigkeits- und Volumenersatz mit einer physiologischen, kristallinen Lösung (Jonosteril, Fresenius Kabi Deutschland GmbH, Bad Homburg, Deutschland).

### **3.3 Lagerung**

Die Lagerung sowohl der Probanden als auch der Patienten erfolgte auf einem Operationstisch (Firma Maquet, Rastatt, Deutschland) mit Rahmen- / Wirbelsäulenkissen und adjustierbaren Armstützen. Siehe dazu Abbildung 8. Die Lagerung der Probanden zeigt Abbildung 9.



Abbildung 8: Patientenlagerung (Quelle: eigene Aufnahme)



Abbildung 9: Probandenlagerung (Quelle: eigene Aufnahme)

Alle Messungen erfolgten im ersten Teil der Studie in Rückenlage mit seitlich ausgelagerten Armen, im zweiten Teil in strikter Bauchlagerung, die Arme nach rostral, seitlich ausgelagert. Die Extremitäten, an denen die Blutdruckmessung durchgeführt wurde, waren so gelagert, dass die Manschette nicht auf der Unterlage aufliegen konnte und die Messung auf Herzhöhe erfolgte.

### 3.4 Blutdruckmessgeräte

In dieser Studie kamen Blutdruckmessgeräte zweier verschiedener Hersteller zur Anwendung. Der Monitor **Lifescopy BSM 2301 k** der Fa. Nihon Kohden Europe GmbH, Rossbach, Deutschland, sowie der Monitor **GE Solar 8000 i** der Fa. GE Medical Systems, Freiburg, Deutschland. Siehe dazu die Abbildungen 10 und 11.

Beide Geräte arbeiten nach dem nichtinvasiven, oszillometrischen Messprinzip. In der Probandengruppe wurde sowohl an der oberen als auch an der unteren Extremität der Monitor Lifescopy BSM 2301 k verwendet. Bei der Patientengruppe erfolgte die Messung am Oberarm mit dem am Narkosearbeitsplatz verbauten Monitor GE Solar 8000 i.



Aufnahme 3 – Nihon Kohden Lifescopy BSM 2301 k (Quelle: eigene Aufnahme)



Aufnahme 4 – GE Solar 8000 i (Quelle: eigene Aufnahme)



### **3.4.1 Technische Daten der eingesetzten Blutdruckmessgeräte**

Eine Übersicht der technischen Daten der verwendeten Blutdruckmessgeräte zeigt Tabelle 3.

	<i>Nihon Kohden Lifescope BSM 2301 k</i>	<i>GE Solar 8000 i</i>
Messmethode	Oszillometrische Blutdruckmessung	Oszillometrische Blutdruckmessung
Messparameter	SAP, MAP, DAP	SAP, MAP, DAP
Messbereich	0 – 300 mmHg	0 – 300 mmHg
Messgenauigkeit	$\pm 3$ mmHg ( $0 \leq \text{NIBP} \leq 200$ mmHg) $\pm 4$ mmHg ( $200 \leq \text{NIBP} \leq 300$ mmHg)	statisch: $\pm 2$ % o. $\pm 3$ mmHg klinisch: $5 \pm 8$ mmHg (MW $\pm$ SD)
Messdauer	Cuffinflationszeit Erwachsene: 7 Sekunden Kinder: 5 Sekunden	Messzyklusdauer 20 – 40 sek.
Initialer Cuffinflationsdruck	Erwachsene: 180 mmHg Kinder: 100 mmHg	Erwachsene: 160 mmHg Kinder: 110 mmHg

Tabelle 3: Technische Daten NIBP-Messung Nihon Kohden Lifescope BSM 2301 k und GE Solar 8000i nach [49, 50]

Die verwendeten Monitore wurden durch die Hersteller nach dem Validierungsprotokoll der Association for the Advancement of Medical Instrumentation (ANSI/AAMI SP 10) auf ihre Messgenauigkeit hin überprüft [51]. Sie erfüllen die Anforderungen bezüglich der geforderten Messgenauigkeit [52, 53].

Beide in der Studie verwendeten Blutdruckmessgeräte sind zum Patienten-Monitoring im laufenden Anästhesiebetrieb regelmäßig eingesetzt und werden durch die Medizintechnik am Klinikum Passau im Intervall auf ihre vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit hin überprüft.

### **3.4.2 Berücksichtigung der Blutdruckmanschettengröße**

Durchgeführt wurden die Blutdruckmessungen mit den Blutdruckmanschetten Flexiport (Welch Allyn Inc., Skaneateles Falls, USA). Vor Anlage erfolgte die Bestimmung der entsprechenden Manschettengröße anhand des gemessenen Umfangs des Oberarms (Musculus biceps brachii) und Unterschenkels (M. Gastrocnemius).

Die Manschettengröße wurde nach den Empfehlungen der American Heart Association (AHA) ausgewählt – vergleiche Tabelle 4. Das Längen-Breitenverhältnis der Manschettenblase ist dabei idealerweise im Verhältnis 2:1 zu nehmen. Die Manschettenlänge sollte 80% und die Manschettenbreite 40% der Extremitätenzirkumferenz betragen [3].

Extremitätenumfang [cm]	Abmessung des Blutdruck- manschetten-Cuffs [cm]	Größenbezeichnung der Blutdruckmanschette
22 bis 26	12 x 22	„small adult“
27 bis 34	16 x 30	„adult“
35 bis 44	16 x 36	„large adult“
45 bis 52	16 x 42	„adult thigh“

Tabelle 4: Empfohlene Blutdruckmanschettengröße, modifiziert nach American Heart Association [3]

In der Studie kamen zwei verschiedene Manschettengrößen patientenadaptiert zur Anwendung.

Zum einen die Manschette Flexiport „Adult“ (Welch Allyn, Skaneateles Falls, USA) für einen Extremitätenumfang von 27 bis 34 cm und zum anderen die Manschette Flexiport „Large Adult“ (Welch Allyn, Skaneateles Falls, USA) für einen Extremitätenumfang von 32 bis 43 cm.



Abbildung 12: Flexiport Manschette, Welch Allyn – „Large Adult“ (Quelle: eigene Aufnahme)

### **3.4.3 Positionierung der Blutdruckmanschetten**

Die Blutdruckmessung erfolgte bei allen Teilnehmern an der rechten oberen und rechten unteren Extremität. Dabei erfolgte die Platzierung der Oberarmmanschette so, dass sie ca. 2-3 cm proximal der Fossa cubitalis zu liegen kam. Die Arteria brachialis befand sich dann in der Mitte der Manschettenblase (Berücksichtigung der Markierung auf der Manschette). Am Unterschenkel wurde die Manschette über der prominentesten Stelle der Wadenmuskulatur platziert, mit der Manschettenblase mittig über dem mutmaßlichen Verlauf der Arteria poplitea.

## **3.5 Vorgehensweise der Datenerhebung**

### **3.5.1 Zeitlicher Ablauf der Messungen**

Initial wurden die Probanden und Patienten in Rückenlage gelagert. Die Blutdruckmanschetten wurden am rechten Oberarm und am rechten Unterschenkel (M. gastrocnemius) angebracht. In der Probandengruppe erfolgte nach einer fünfminütigen Ruhephase die erste simultane Messung des Blutdrucks an Oberarm und Unterschenkel zum Zeitpunkt T1, gefolgt von der zweiten simultanen Messung nach mindestens dreiminütigem Zeitabstand zur ersten Messung zum Zeitpunkt T2. In der Patientengruppe erfolgte die erste simultane Messung nach mindestens fünfminütigem zeitlichen Abstand zur Narkoseinduktion und endotrachealen Intubation, nachdem sich eine stabile Kreislauftsituation nach mehrmaliger Blutdruckkontrolle eingestellt hatte.

War in der Patientengruppe zur Stabilisierung der Hämodynamik die Gabe kreislaufwirksamer Medikamente erforderlich, so wurde mindestens fünf Minuten bis zur nächsten Blutdruckmessung abgewartet, bis stabile Kreislaufverhältnisse hergestellt waren.

Nach Umlagerung in die Bauchlage fand die dritte simultane Messung zum Zeitpunkt T3 nach mindestens fünfminütigem Zeitintervall statt. Die vierte simultane Messung zum Zeitpunkt T4 erfolgte dann nach mindestens dreiminütiger Wartezeit nach der dritten Messung.

Die erhobenen Parameter umfassten neben dem systolischen, diastolischen und mittleren arteriellen Blutdruck auch die Herzfrequenz und die pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung. Eine Übersicht zum zeitlichen Ablauf der Messungen zeigt Abbildung 13.

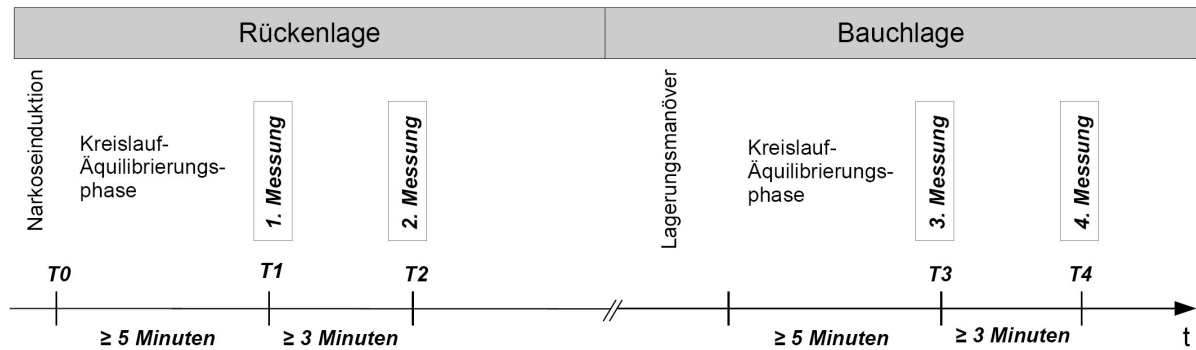


Abbildung 13: zeitlicher Ablauf der Messungen

### 3.6 Statistische Auswertung

Mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms „Excel“ (Microsoft Corporation, Redmond, USA) erfolgte die statistische Auswertung der Ergebnisse.

Zunächst wurden die Messwerte der simultanen Blutdruckmessungen an Oberarm und Unterschenkel mit Hilfe eines Streudiagramms visualisiert und die Korrelationskoeffizienten bestimmt. Das Signifikanzniveau berechnete sich mit dem Student t-Test für verbundene Wertepaare. Es erfolgte eine formale Testprozedur auf eine nicht vorhandene Verzerrung. Dazu wurde die Differenz der Messwerte (Oberarm – Unterschenkel) betrachtet. Bei einem p-Wert  $< 0,05$  wurde der Unterschied als signifikant betrachtet.

Für die Beurteilung der Übereinstimmung der beiden Messverfahren wurde die Streuung der Differenzen der einzelnen Messwertepaare untersucht und mit Hilfe des von Bland und Altman beschriebenen Verfahrens veranschaulicht [54]. Unter der Annahme, dass die Differenzen der Messwertepaare einer Normalverteilung folgen, wurden die Standardfehler und Konfidenzintervalle für die Verzerrung und die Übereinstimmungsgrenzen berechnet.

## **4. Ergebnisse**

In der Probandengruppe wurden an 31 Studienteilnehmern jeweils 124 simultane Blutdruckmessungen an Oberarm und Unterschenkel durchgeführt. In der Patientengruppe waren es 128 simultane Messungen an 32 Teilnehmern.

### **4.1 Demographische Daten der Probandengruppe**

Die Probandengruppe bestand aus 20 weiblichen und 11 männlichen Teilnehmern aus dem Personalpool des Klinikum Passau. Das Durchschnittsalter betrug 32 Jahre. Eine vollständige Übersicht zeigt Tabelle 5.

Probandengruppe [MW $\pm$ SD (Min./Max.)]	
Geschlecht	weiblich n = 20 männlich n = 11
Alter	31 $\pm$ 9 (20 /58) Jahre
Körpergröße	170 $\pm$ 9 (157/203) cm
Körpergewicht	70 $\pm$ 16 (50/110) kg
Body-Maß-Index	25 $\pm$ 4 (19/35) kg/m <sup>2</sup>

Tabelle 5: Probandencharakteristik – demographische Daten

Ein Proband wurde wegen arterieller Hypertonie mit Amlodipin und Telmisartan behandelt. Bei den übrigen Probanden bestand keine Eigenmedikation.

### **4.2 Demographische Daten der Patientengruppe**

Die Patientengruppe umfasste 17 weibliche und 15 männliche Teilnehmer, die sich einem unfallchirurgischen beziehungsweise neurochirurgischen Eingriff unterzogen, der eine intraoperative Bauchlagerung erforderlich machte. Das Durchschnittsalter betrug 56 Jahre. Eine vollständige Übersicht zeigt Tabelle 6.

Patienten [MW $\pm$ SD (Min./Max.)]	
Geschlecht	weiblich n = 17 männlich n = 15
Alter	56 $\pm$ 15 (28/83) Jahre
Körpergröße	168 $\pm$ 9 (145/185) cm
Körpergewicht	81 $\pm$ 13,9 (52/110) kg
Body-Maß-Index	27,8 $\pm$ 4,8 (21,9/41,3) kg/m <sup>2</sup>

Tabelle 6: Patientencharakteristik – demographische Daten

Im Rahmen der Prämedikationsvisite erfolgte eine Graduierung des physischen Ausgangszustands der Patienten nach der Klassifikation der American Society of Anesthesiologists [55]. Die Verteilung zeigt Tabelle 7.

ASA-Klassifikation – Definition		Patientenanzahl
ASA I	„normal gesunder Patient“	n = 3
ASA II	„Patient mit milder Systemerkrankung ohne Einschränkung der körperlichen Leistungsfähigkeit“	n = 15
ASA III	„Patient mit schwerer Systemerkrankung mit Einschränkung der körperlichen Leistungsfähigkeit“	n = 14
ASA IV	„Patient mit schwerer Allgemeinerkrankung, die eine ständige Lebensbedrohung ist“	n = 0
ASA V	„moribunder Patient, der ohne Operation voraussichtlich nicht überleben wird“	n = 0

Tabelle 7: ASA-Klassifikation nach [55]

56 % der Patienten (n=18) wiesen eine arterielle Hypertonie unter den Begleiterkrankungen auf. Das Spektrum der antihypertensiven Therapie zeigt Tabelle 8. Es reichte zum Operationszeitpunkt von einer antihypertensiven Monotherapie bis zur Einnahme von fünf Präparaten verschiedener Wirkstoffgruppen.

Antihypertensive Therapie in der Patientengruppe	Patientenanzahl	Verwendete Medikamentengruppe	Patientenanzahl
Monotherapie	n=1	Betablocker	n=11
Kombinationstherapie	(n=17)	Calciumantagonist	n=6
- 2 Präparate	n=4	Diuretikum	n=13
- 3 Präparate	n=11	AT II – Rezeptorblocker	n=10
- 4 Präparate	n=1	ACE-Hemmer	n=8
- 5 Präparate	n=1	Nitrat	n=2
		Imidazolinderivat	n=1

Tabelle 8: Antihypertensive Therapie in der Patientengruppe

Bei 31 Patienten zeigte sich perioperativ ein Sinusrhythmus im Elektrokardiogramm, ein Patient wies ein permanentes Vorhofflimmern auf.

Die Patienten unterzogen sich sämtlich einer unfallchirurgischen Operation mit der Notwendigkeit zur intraoperativen Bauchlagerung. Die durchgeführten Eingriffe zeigt Tabelle 9.

Operation	Patientenanzahl
Dorsale Spondylodese	n = 8
Dorsale Spondylodese und mikrochir. Dekompression	n = 16
Mikrochir. Dekompression	n = 2
Metallentfernung an der Wirbelsäule	n = 2
Revision bei chron. Liquorloss (Z.n. mikrochirurg. Dekompression)	n = 1
Metallentfernung Oberarm und Becken	n = 1
Suralislappenplastik Unterschenkel	n = 1
Tibiakopffraktur mit Beckenspongiosa	n = 1

Tabelle 9: Spektrum der Operationen in der Patientengruppe

### **4.3 Messwerte**

Die jeweils verwendeten Blutdruckmanschettengrößen orientierten sich am Extremitätenumfang der Studienteilnehmer. Tabelle 10 zeigt die Oberarm- und Unterschenkelzirkumferenzen des Probanden- und Patientenkollektivs.

Extremitätenumfang [cm]	Patienten	Probanden
Oberarm (Arteria brachialis)	30,0 (26-41) $\pm$ 3,5	29,0 (22-36) $\pm$ 3,4
Unterschenkel (M. gastrocnemius)	35,7 (29-45) $\pm$ 3,9	38,7 (32-49) $\pm$ 4,0

Tabelle 10: Extremitätenumfang des Patienten- und Probandenkollektivs: [MW (min-max)  $\pm$  SD]; MW: Mittelwert, min: Minimum, max: Maximum, SD: Standardabweichung

Bei den Messungen relevante Parameter waren neben dem systolischen, dem mittleren arteriellen und dem diastolischen Blutdruck auch die Herzfrequenz und die pulsoxymetrisch bestimmte Sauerstoffsättigung. Eine Übersicht aller erhobenen Messwerte zeigen die Tabellen 16 bis 19 im Anhang.

Der systolische Blutdruck am Oberarm betrug in der Probandengruppe in Rückenlage  $122,8 \pm 11,4$  (MW  $\pm$  SD [mmHg]), der mittlere arterielle Blutdruck wurde mit  $86,6 \pm 8,4$  und der diastolische Blutdruck mit  $72,8 \pm 9,2$  gemessen. Die Herzfrequenz war dabei  $71,6 \pm 10,4$  (MW  $\pm$  SD [1/ min]) und die pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung betrug  $97,7 \pm 1,2$  (MW  $\pm$  SD [%]).

In der Patientengruppe war in Rückenlage am Oberarm der systolische Blutdruck  $125,2 \pm 25,9$  (MW  $\pm$  SD [mmHg]), der mittlere arterielle Blutdruck  $89,5 \pm 16,5$  und der diastolische Blutdruck  $68,3 \pm 11,0$ . Die Herzfrequenz war dabei  $69,7 \pm 11,8$  (MW  $\pm$  SD [1/ min]) und die pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung betrug  $98,8 \pm 0,88$  (MW  $\pm$  SD [%]). Eine vollständige Übersicht zeigen die Tabellen 11 und 12.

Probanden				
	Rückenlage		Bauchlage	
	Oberarm	Unterschenkel	Oberarm	Unterschenkel
SAP [mmHg]	$122,8 \pm 11,4$	$136,8 \pm 12,7$	$123,4 \pm 9,7$	$130 \pm 14,3$
MAP [mmHg]	$86,6 \pm 8,4$	$81,5 \pm 11,3$	$89,1 \pm 8,7$	$80,6 \pm 10,3$
DAP [mmHg]	$72,8 \pm 9,2$	$61,5 \pm 9,7$	$75,2 \pm 9,0$	$58,9 \pm 9,5$
HF [1/min]	$71,6 \pm 10,4$		$70,6 \pm 10,9$	
SpO2 [%]	$97,7 \pm 1,2$		$97,6 \pm 1,3$	

Tabelle 11: Messwerte der Probandengruppe (MW  $\pm$  SD)



Patienten				
	Rückenlage		Bauchlage	
	Oberarm	Unterschenkel	Oberarm	Unterschenkel
SAP [mmHg]	125,2 ± 25,9	122,3 ± 26,9	125,5 ± 16,5	120,3 ± 19,4
MAP [mmHg]	89,5 ± 16,5	75,9 ± 15,7	90,5 ± 10,7	77,3 ± 13,0
DAP [mmHg]	68,3 ± 11,0	54,5 ± 13,6	68,1 ± 8,8	56,8 ± 10,8
HF [1/min]	69,7 ± 11,8		64,2 ± 11,6	
SpO2 [%]	98,8 ± 0,9		98,3 ± 1,4	

Tabelle 12: Messwerte der Patientengruppe (MW ± SD)

Die erhobenen Blutdruckwerte der simultanen Oberarm- und Unterschenkelmessungen wurden für den MAP in den Abbildungen 14 bis 17 gegeneinander aufgetragen und als Streudiagramm mit eingetragener Winkelhalbierender visualisiert. Die entsprechenden Streudiagramme für den SAP und DAP zeigen die Abbildungen 22 bis 29 im Anhang.

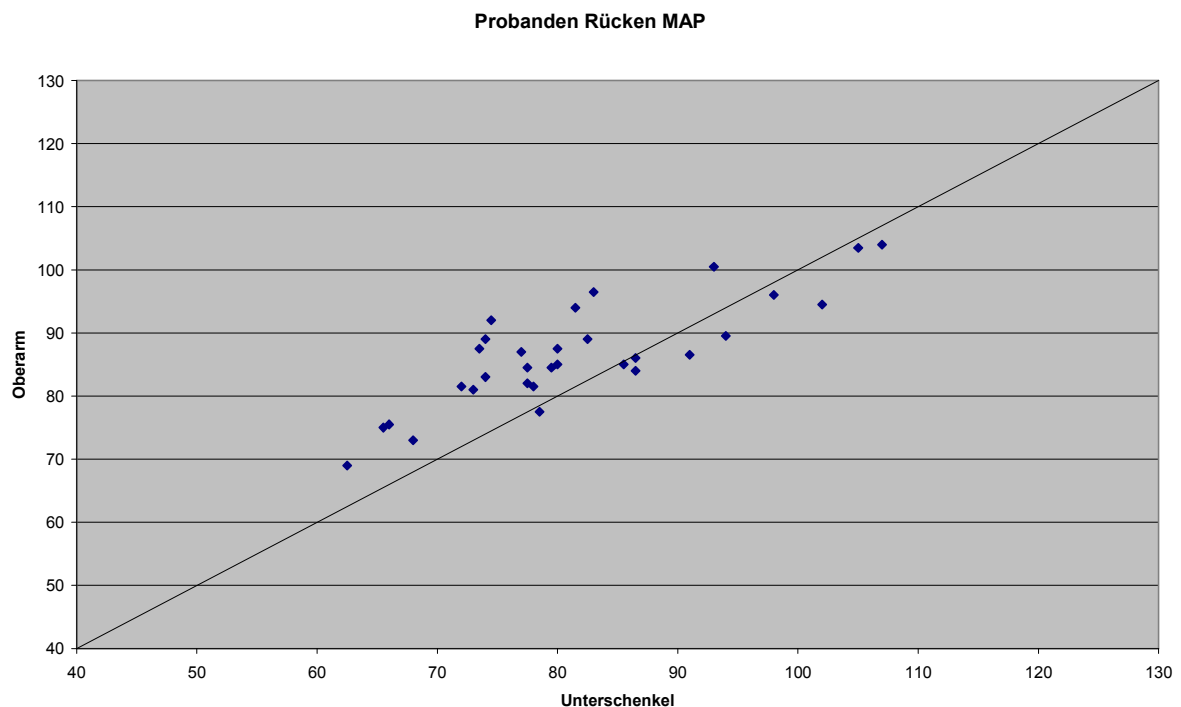


Abbildung 14: Streudiagramm – Probandengruppe: Rückenlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

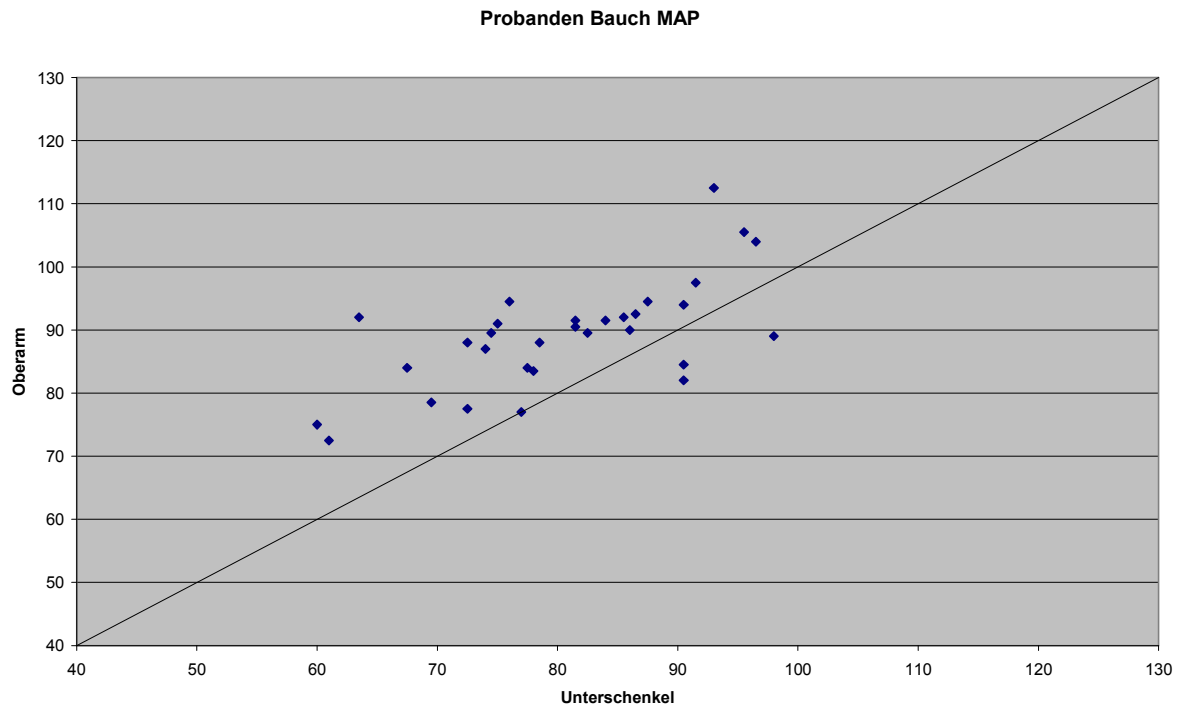


Abbildung 15: Streudiagramm – Probandengruppe: Bauchlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

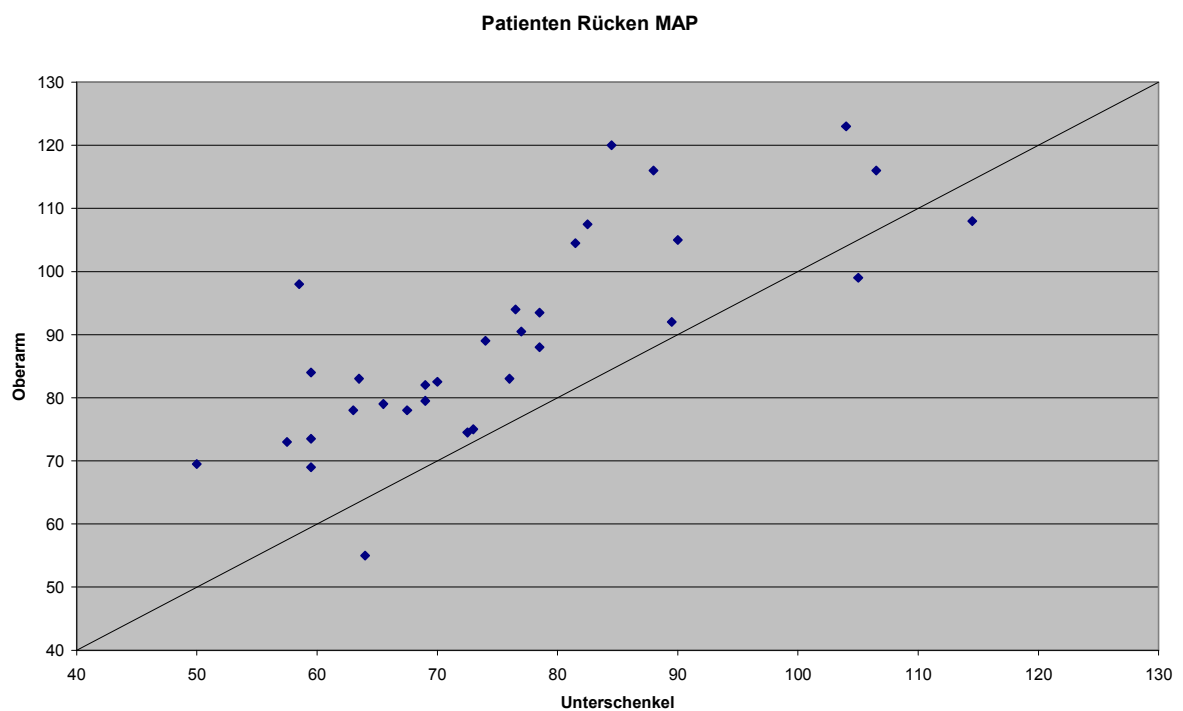


Abbildung 16: Streudiagramm – Patientengruppe: Rückenlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

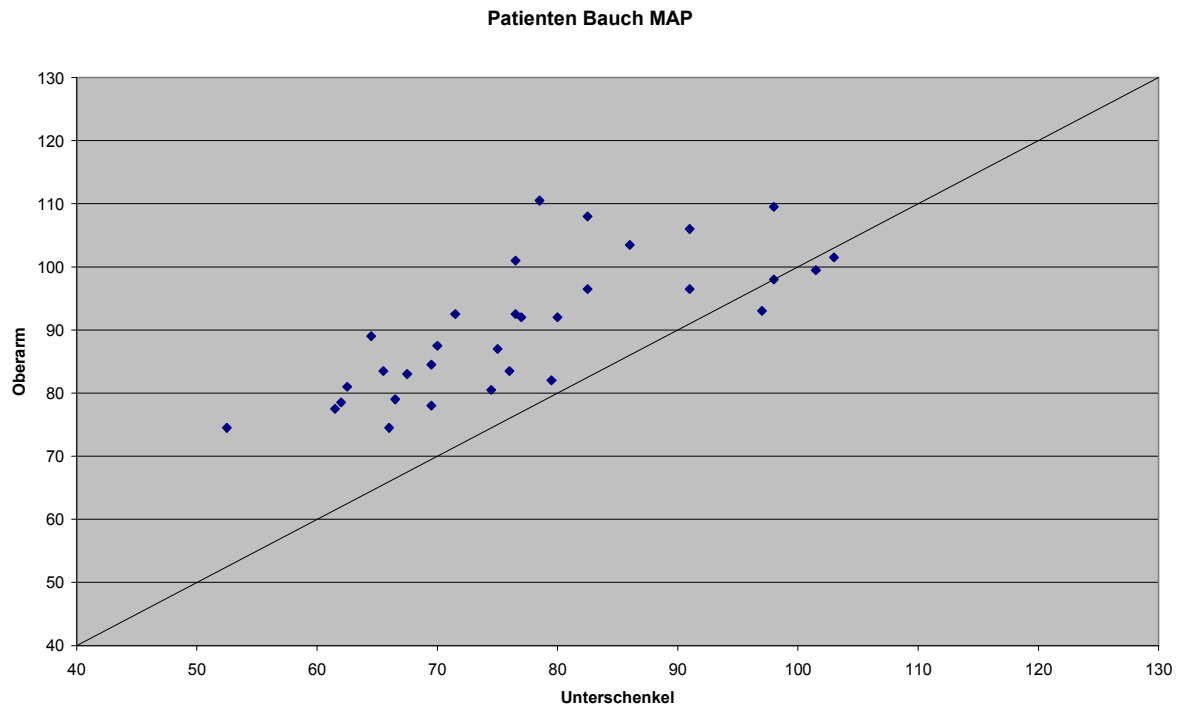


Abbildung 17: Streudiagramm – Patientengruppe: Bauchlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

Zum Vergleich der simultanen Blutdruckmessungen am Oberarm und Unterschenkel wurden die Differenzen der Mittelwerte der korrespondierenden Messungen und die Standardabweichungen der Mittelwerte berechnet. Außerdem wurden die Übereinstimmungsgrenzen (95% limits of agreement) mit Hilfe von Mittelwert und Standardabweichung bestimmt. Sie legen den Messwertebereich fest, in dem sich unter der Annahme normalverteilter Messwerte 95% der erhobenen Werte befinden.

obere / untere Übereinstimmungsgrenzen (95% Limit of agreement):  $MW \pm 2 \times SD$

Um die Ergebnisse der Studienpopulation auf die Grundgesamtheit zu übertragen und damit eine Aussage über die Präzision der berechneten Verzerrung und Streuung der Differenzen der beiden Messverfahren zu erhalten, wurde mit Hilfe des Standardfehlers das Konfidenzintervall bestimmt. Voraussetzung ist dafür die Annahme, dass die Messwertdifferenzen annähernd einer Normalverteilung folgen. Das 95%-Konfidenzintervall definiert einen Messwertebereich, in dem sich 95% der Stichprobenergebnisse der Grundgesamtheit befinden. Das Konfidenzintervall ist von der Testgröße, vom Standardfehler und damit von der Stichprobengröße und der Standardabweichung abhängig.

Zur Berechnung des Standardfehlers S des Mittelwertes d, sowie für  $d \pm 2 \times SD$  vergleiche Infobox 5. Ebenso für die Berechnung des 95%-Konfidenzintervalls.

<b>Standardfehler</b>	
Mittelwert:	$S(d) = SD/n^{1/2}$
95% Limits of agreement:	$S(d \pm 2 \times SD) = (3 \times SD^2/n)^{1/2}$
<b>95%-Konfidenzintervall</b>	
Mittelwert:	$d \pm (t \times S(d))$
95% Limits of agreement:	$d - 2 \times SD \pm [t \times S(d \pm 2 \times SD)]$ $d + 2 \times SD \pm [t \times S(d \pm 2 \times SD)]$

Infobox 5 – Berechnung des Standardfehlers und des Konfidenzintervalls; Quelle: nach [64]

Das kritische t in der studentischen t-Verteilung wurde einer Tabelle für verbundene Wertepaare und zweiseitigem Testverfahren entnommen und beträgt für 30 beziehungsweise 31 Freiheitsgrade (n-1) 2,042. Siehe dazu Tabelle 20 im Anhang. Tabelle 13 und 14 geben

die Mittelwerte, die Standardabweichungen, die 95% Übereinstimmungsintervalle (95% Limits of agreement), sowie die 95% Konfidenzintervalle für die Messwertdifferenzen (Oberarm – Unterschenkel) wieder.

Probanden									
				95% Limits of agreement		95% Konfidenzintervall		t-Test	Korrelation
		MW	SD	von	bis	von	bis		
Rückenlage	SAP	- 14,0	10,6	-35,3	7,3	- 42	14	< 0,01	0,61
	MAP	5,1	6,4	-7,8	18,0	- 12	22	< 0,01	0,83
	DAP	11,3	6,4	-1,5	24,1	- 6	28	< 0,01	0,77
Bauchlage	SAP	- 6,5	11,6	-29,7	16,8	- 37	24	< 0,01	0,60
	MAP	8,5	7,9	-7,3	24,4	- 13	29	< 0,01	0,66
	DAP	16,3	4,8	6,7	26,0	4	29	< 0,01	0,87

Tabelle 13: Mittlere Differenz (Oberarm – Unterschenkel), Standardabweichung, 95% Übereinstimmungsgrenzen (Limits of agreement), 95% Konfidenzintervall, Signifikanzniveau und Korrelationskoeffizient der Probandengruppe (MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung [mmHg])

Legende Infobox 5: S: Standardfehler, d: Mittelwert, SD: Standardabweichung, n: Anzahl der Studienteilnehmer, t: t-Verteilung mit n-1 Freiheitsgraden;

Patienten									
		95% Limits of agreement		95% Konfidenzintervall		t-Test		Korrelation	
		MW	SD	von	bis	von	bis		
Rückenlage	SAP	2,8	16,2	- 29,5	35,2	- 35	45	0,33	0,81
	MAP	13,6	10,8	- 8,1	35,2	- 15	42	< 0,01	0,78
	DAP	13,8	8,6	- 3,4	30,9	- 9	36	< 0,01	0,78
Bauchlage	SAP	5,3	15,6	- 26,0	36,6	- 36	46	0,07	0,63
	MAP	13,2	8,5	- 3,8	30,3	- 9	36	< 0,01	0,76
	DAP	11,3	7,6	- 3,9	26,4	- 9	31	< 0,01	0,72

Tabelle 14: Mittlere Differenz (Oberarm – Unterschenkel), Standardabweichung, 95% Übereinstimmungsgrenzen (Limits of agreement), 95% Konfidenzintervall, Signifikanzniveau und Korrelationskoeffizient der Patientengruppe (MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung [mmHg])

In der Probandengruppe zeigten die Messwerte am Oberarm und am Unterschenkel im Streudiagramm einen positiven linearen Zusammenhang. Die größte Übereinstimmung zwischen den beiden Messorten konnte für den MAP nachgewiesen werden. Dies war sowohl in Rücken- als auch in Bauchlage der Probanden der Fall (Bias  $5,1 \pm 6,4$  mmHg, respektive  $8,6 \pm 7,9$  mmHg [MW $\pm$ SD]). Der systolische Blutdruck war an der unteren Extremität stets höher als am Oberarm gemessen worden. Der mittlere arterielle und diastolische Blutdruck waren dagegen am Unterschenkel regelmäßig niedriger als am Oberarm.

Auch in der Patientengruppe zeigte sich im Streudiagramm ein positiv-linearer Zusammenhang der Blutdruckparameter zwischen den Messorten. Die mittlere Abweichung des MAP zwischen der Oberarm- und Unterschenkelmessung in Rücken- und Bauchlage war etwas größer als in der Probandengruppe (Bias  $13,6 \pm 10,8$  mmHg, respektive  $13,2 \pm 8,5$  mmHg [MW $\pm$ SD]). Ein klinisch relevanter Unterschied zwischen der Rücken- und Bauchlage war hier ebenfalls nicht festzustellen.

Auffallend war, dass die Abweichung des systolischen Blutdrucks, in der Patientengruppe sowohl in Rücken- als auch in Bauchlage deutlich geringer war, als in der Probandengruppe (Bias  $2,8 \pm 16,2$  mmHg, respektive  $5,3 \pm 15,6$  mmHg [MW $\pm$ SD]). Auf den ersten Blick scheint der systolische Blutdruck in der Patientengruppe gut zwischen der oberen und unteren Extremität übereinzustimmen. Alle Blutdruckparameter wurden am Oberarm stets höher als am Unterarm bestimmt. Eine systolische Amplitudenüberhöhung war an der unteren Extremität somit in der Patientengruppe nicht nachzuweisen.

In einer formalen Testprozedur mit Hilfe des gepaarten t-Tests wurde die Übereinstimmung der beiden Messverfahren an Oberarm und Unterschenkel überprüft und die Messwertdifferenzen auf eine nicht vorhandene Verzerrung untersucht. Dazu wurde die

Differenz der simultan erhobenen Messwerte am Oberarm und Unterschenkel herangezogen. Bei einem p-Wert  $< 0,05$  wurde der Unterschied als signifikant, bei einem p-Wert  $< 0,01$  als hochsignifikant betrachtet. Die Tabellen 13 und 14 zeigen die Ergebnisse des Student t-Test. Die Testgröße  $t$  berechnet sich aus dem Quotienten des Betrags der mittleren Messwertdifferenz  $d$  und dem Standardfehler  $S$  von  $d$ .

$$\text{Testgröße } t = |d| / S(d)$$

Der Standardfehler  $S$  von  $d$  berechnet sich dabei wie folgt:

$$\text{Standardfehler } S(d) = SD / n^{1/2}$$

$S$ : Standardfehler,  $d$ : mittlere Messwertdifferenz,  $SD$ : Standardabweichung,  $n$  = Anzahl der Studienteilnehmer

Der t-Test für verbundene Wertepaare zeigte, dass die Unterschiede der Messwerte, erhoben am Oberarm und Unterschenkel in der Probanden- sowie Patientengruppe für den mittleren arteriellen und diastolischen Blutdruck auf dem üblichen 5%-Niveau statistisch signifikant waren. Dies gilt auch für die systolischen Blutdruckwerte in der Probandengruppe. In der Patientengruppe kann die Nullhypothese „Messwerte unterscheiden sich“ auf dem üblichen 5%-Niveau für den systolischen Blutdruck nicht angenommen werden (Rückenlage:  $p = 0,328$ ; Bauchlage:  $p = 0,066$ ).

Die Beurteilung der Übereinstimmung von Messmethoden erfordert aber neben der Berücksichtigung der durchschnittlichen Differenz, also der Verzerrung der Messwerte, auch die Betrachtung der Streuung der Differenzen der einzelnen Messwertepaare um den Mittelwert. Mit Hilfe des Analyseverfahrens von Bland und Altman [54] wurden die Daten in Form eines Plots grafisch dargestellt. Damit können Verzerrung und Streuung der Daten berücksichtigt und visualisiert werden. In den Abbildungen 18 bis 21 sind die Bland-Altman-Plots für den SAP und MAP in Rückenlage dargestellt. Die Abbildungen 30 bis 37 im Anhang zeigen die entsprechenden Plots für den SAP und MAP in Bauchlage und für den DAP. Die Differenzen der Messwerte, erhoben am Oberarm und Unterschenkel werden gegen den Mittelwert der Oberarm- und Unterschenkelmessung grafisch aufgetragen. Der Mittelwert der beiden Messwerte stellt die bestmögliche Schätzung des tatsächlich wahren, aber unbekannten Blutdruckwertes dar. In den Plots ist die mittlere Verzerrung der Messwertdifferenzen als Mittelwert-Linie (MW) und die Streuung als obere und untere Übereinstimmungsgrenzen-Linie ( $2 \times SD$ ) eingetragen. Bei einer annähernd symmetrischen Verteilung der Messwerte liegen 95% der Messwerte im Bereich  $MW \pm 2 \times SD$ .

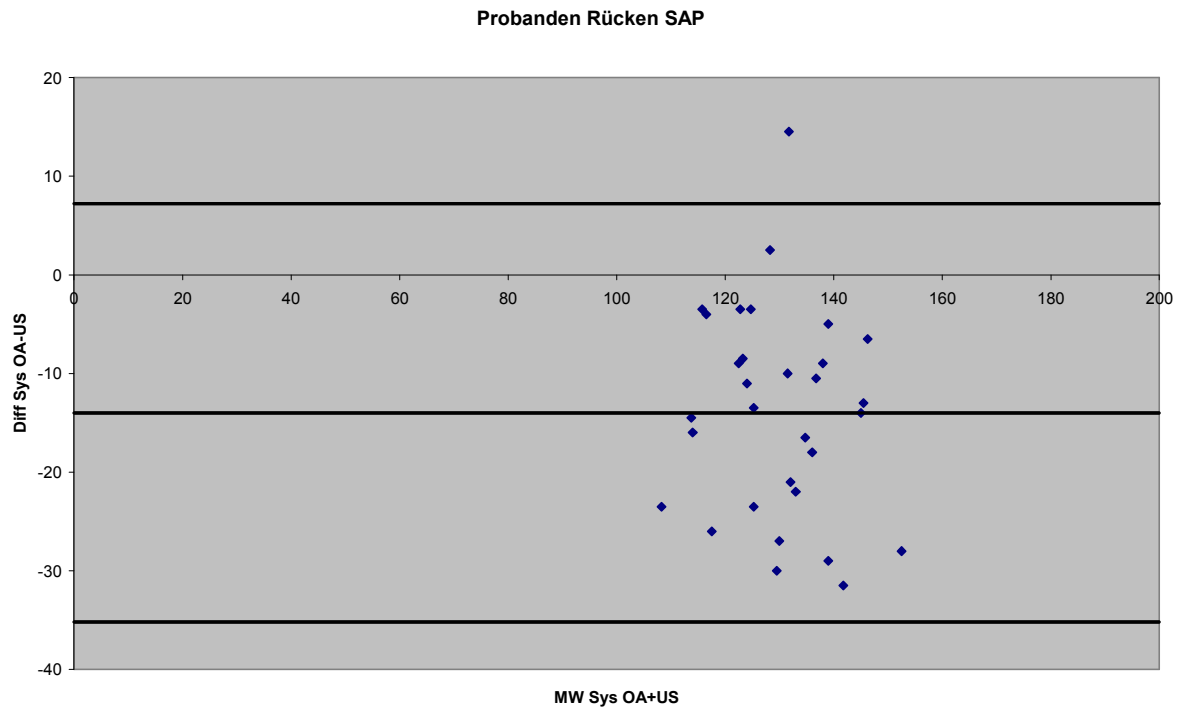


Abbildung 18: Bland-Altman-Plot, Probanden, Rückenlage, systolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

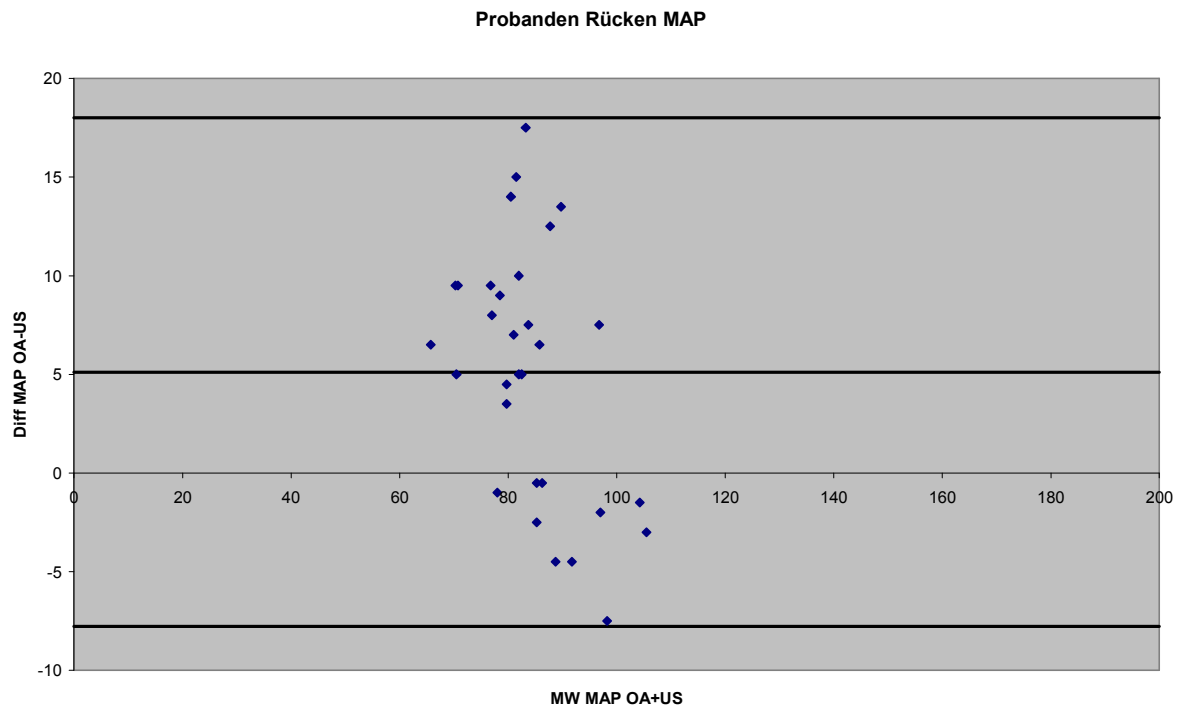


Abbildung 19: Bland-Altman-Plot, Probanden, Rückenlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

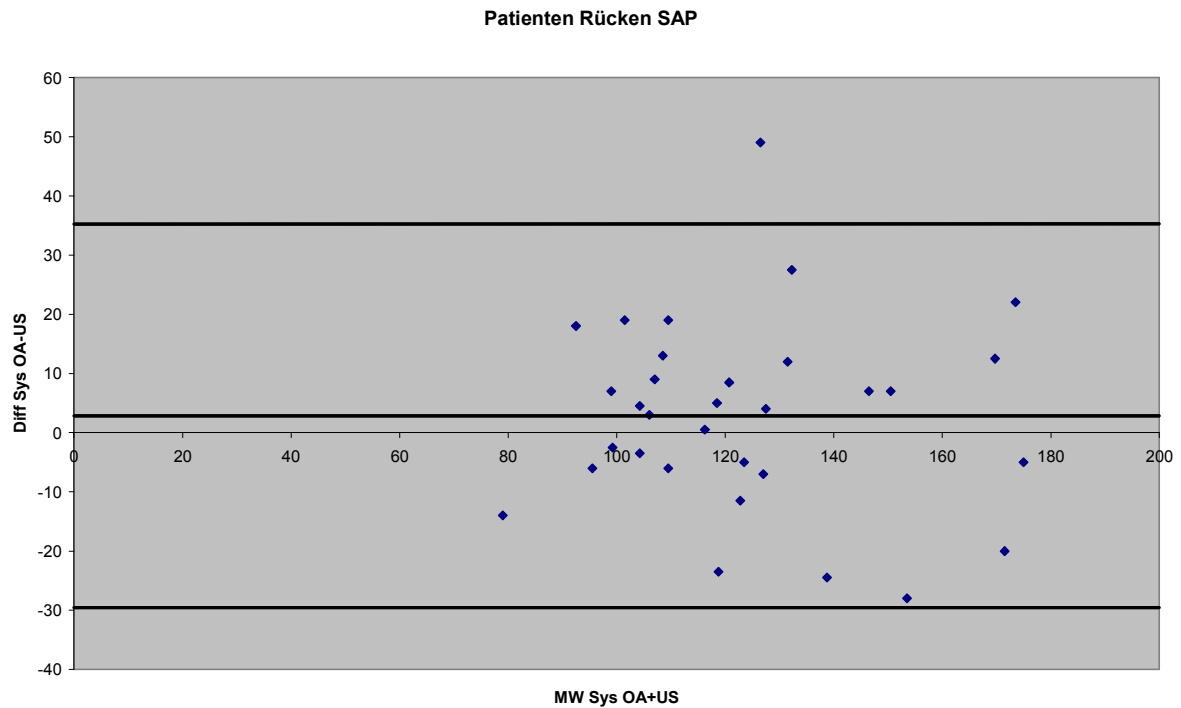


Abbildung 20: Bland-Altman-Plot, Patienten, Rückenlage, systolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

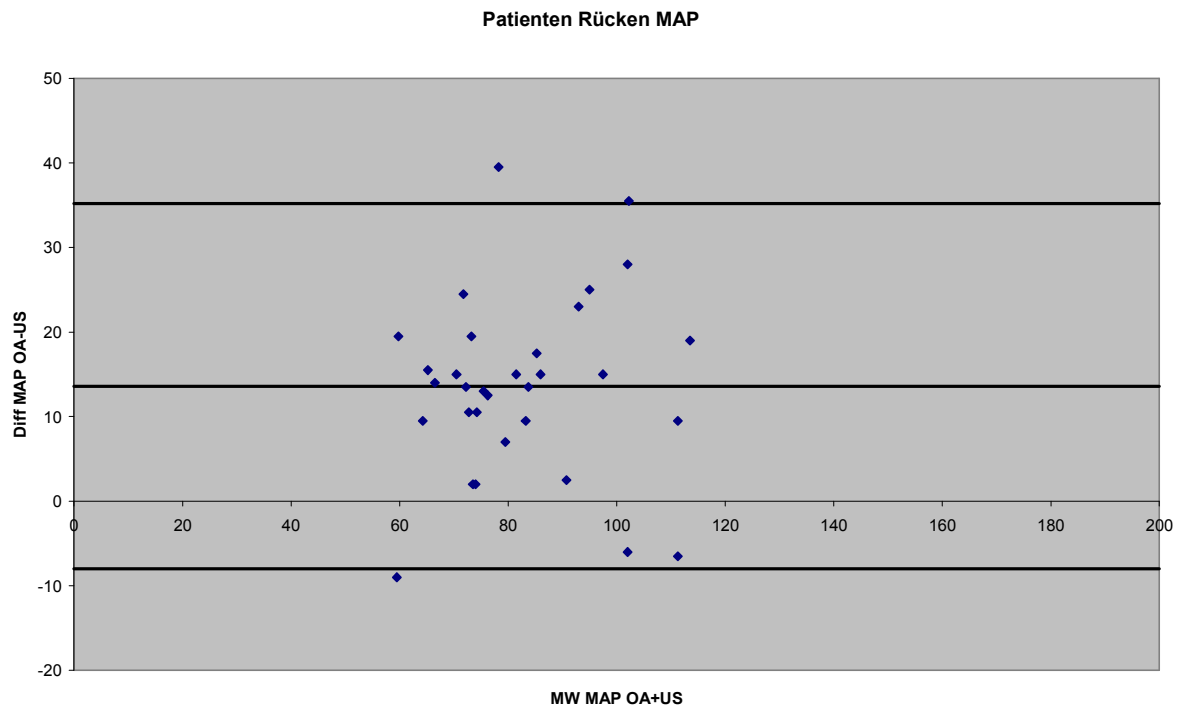


Abbildung 21: Bland-Altman-Plot, Patienten, Rückenlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])



## **5. Diskussion**

Jährlich werden weltweit circa 230 Millionen Allgemeinanästhesieverfahren durchgeführt [56]. Die perioperative Kreislaufüberwachung erfolgt dabei in den meisten Fällen mit Hilfe der oszillometrischen Blutdruckmessung, standardisiert am Oberarm, über der Arteria brachialis. Die Relevanz der exakten Erfassung des Patientenblutdrucks ist in einer Zunahme der perioperativen Morbidität und Mortalität durch eine nicht erkannte und folglich unbehandelte Hypotonie des Patienten begründet. Die oszillometrische Blutdruckmessung an einem vom etablierten Standard über der Arteria brachialis abweichenden Messort muss daher mit ausreichender Genauigkeit die Messwerte der Oberarmmessung widerspiegeln. Nur dann ist gewährleistet, dass der Patient nicht durch Fehlmessungen des Blutdrucks und konsekutiver Unterlassung einer Blutdrucktherapie gefährdet wird.

Mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche in den Datenbanken von Medline und Embase wurde die vorhandene Literatur zu diesem Thema durchgesehen. Es fanden sich verschiedene Publikationen, die die Gleichwertigkeit der nichtinvasiven oszillometrischen Blutdruckmessung am Unterschenkel anhand des etablierten Standards am Oberarm überprüft haben. Die Messungen erfolgten dabei an wachen Probanden oder an Patienten die sich einem Eingriff in rückenmarksnaher Regionalanästhesie unterzogen [57, 58, 59], oder an Patienten in Allgemeinanästhesie in Rückenlage [6, 69, 70, 71, 72, 73]. Auf die Ergebnisse soll im Folgenden eingegangen werden.

In der klinischen Praxis ist jedoch intraoperativ nicht selten eine operationsbedingte Anpassung der Patientenlagerung erforderlich – bestimmte Eingriffe sind zum Beispiel nur in Bauchlagerung möglich. Auch in diesem Fall muss die oszillometrische Blutdruckmessung valide Blutdruckmesswerte liefern können. Es ist daher von besonderem Interesse die Zuverlässigkeit der oszillometrischen Blutdruckmessung an einem Messort, abweichend vom Oberarm, unter dem Einfluss einer Allgemeinanästhesie und während intraoperativer Bauchlagerung zu überprüfen, da dies die gängige Praxis der Narkoseüberwachung widerspiegelt. Daten über die Validität einer Blutdruckmessung am Unterschenkel an wachen Probanden und während einer Allgemeinanästhesie in Bauchlagerung wurden aber bis jetzt noch nicht publiziert.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte deshalb die simultane oszillometrische Messung des Blutdrucks am Oberarm über der Arteria brachialis und am Unterschenkel über dem Muskulus gastrocnemius. Die Messungen wurden an zwei unterschiedlichen Kollektiven durchgeführt. Zum einen an wachen Probanden als Referenz, zum anderen an Patienten, die

sich einem Eingriff in Allgemeinanästhesie unterzogen. Des Weiteren wurde die Lagerung der Studienteilnehmer berücksichtigt. Alle Messungen wurden jeweils in Rücken- und in Bauchlagerung durchgeführt. Die Blutdruckmesswertepaare der Oberarm- und Unterschenkelmessung wurden einander gegenübergestellt und etwaige klinisch relevante Differenzen unter zwei Gesichtspunkten bewertet. Kann am Unterschenkel eine drohende Hypotonie nichtinvasiv-oszillometrisch genauso zuverlässig wie am Oberarm erfasst werden? Und beeinflussen eine Allgemeinanästhesie beziehungsweise die intraoperative Patientenlagerung die Messwertdifferenzen respektive die Messgenauigkeit zwischen der Oberarm- und Unterschenkelmessung?

### **5.1 Vergleichende Blutdruckmessung in der Probandengruppe**

In der Probandengruppe wurden 31 Patienten in die Studie eingeschlossen. In Rückenlage war die größte Übereinstimmung der simultanen Blutdruckmessung an Oberarm und Unterschenkel für den MAP nachzuweisen. Der SAP war an der unteren Extremität bei allen Patienten deutlicher höher als am Oberarm. Der MAP und DAP fielen dagegen am Unterschenkel stets niedriger als am Oberarm aus.

Die Ergebnisse decken sich mit früheren Arbeiten, die ebenfalls eine vergleichende oszillometrische Blutdruckmessung an Oberarm und Unterschenkel an wachen Patienten oder Probanden in Rückenlage durchgeführt hatten.

Moore et al. untersuchten dazu 98 Probanden in halbsitzender Lagerung (30° Oberkörperhochlagerung) und konnten ebenfalls die größte Übereinstimmung zwischen den oszillometrischen Blutdruckmessungen an Oberarm und Unterschenkel, über dem Musculus gastrocnemius für den MAP nachweisen – er war am Oberarm im Mittel etwas niedriger als am Unterschenkel, der DAP verhielt sich entgegengesetzt. Der SAP war dagegen am Unterschenkel deutlich höher als am Oberarm. [57].

Sareen et al. führten an 250 wachen Patienten (ASA I-III) in Rückenlage vor Narkoseinduktion eine vergleichende oszillometrische Blutdruckmessung an Oberarm und Unterschenkel durch. Auch in dieser Arbeit war der MAP der Parameter mit der besten Übereinstimmung zwischen den beiden Messorten, mit im Mittel am Unterschenkel höheren Werten. Der systolische Blutdruck war am Unterschenkel wiederum deutlich höher als am Oberarm, im Sinne einer systolischen Amplitudenüberhöhung, der DAP dagegen niedriger als am Oberarm [58].

In einer 2014 publizierten Arbeit von Goldstein et al. erfolgte an 201 wachen Patienten in einer Notaufnahme die simultane oszillometrische Blutdruckmessung an Oberarm und

Unterschenkel, über dem Sprunggelenk. Der SAP wurde auch hier am Unterschenkel deutlich höher gemessen als am Oberarm. Der MAP zeigte zwar eine gute klinische Übereinstimmung (innerhalb  $\pm 10$  mmHg) zwischen beiden Messorten, jedoch ohne statistische Signifikanz. Der MAP war im Mittel am Unterschenkel höher, der DAP dagegen niedriger als der korrespondierende Wert am Oberarm [65].

Zusammenfassend zeigen die Blutdruckwerte an oberer und unterer Extremität in Rückenlage in allen Arbeiten ein einheitliches und charakteristisches Verhalten. Die größte Abweichung zwischen beiden Messorten bestand für den SAP, der am Unterschenkel jeweils deutlich höher als am Oberarm bestimmt wurde. Auch der MAP war am Unterschenkel höher als am Oberarm, die gemittelte Differenz zwischen den Messorten jedoch gering. Dies gilt auch für den DAP, der am Unterschenkel aber niedriger als am Oberarm bestimmt wurde.

Burdick et al. beschrieben bereits 1925 das Phänomen des erhöhten systolischen Blutdrucks an der unteren Extremität im Vergleich zum Oberarm [66]. Ursächlich dafür ist der arterielle Gefäßbaum, der die für den Blutdruck relevante Pulsdruckwelle auf ihrem Weg in die Peripherie auf mehrfache Weise beeinflusst. Die physiologische Abnahme der Gefäßcompliance mit konsekutiver Zunahme der Pulswellengeschwindigkeit, Abnahme der Gefäßradien und Reflexion und Interferenz von Pulsdruckwellen in der Gefäßperipherie führen zu einer Zunahme des arteriellen Spitzendrucks, also des systolischen Blutdrucks. Daraus folgt eine systolische Blutdruckdifferenz zwischen oberer und unterer Extremität, die beim gesunden jüngeren Erwachsenen bis zu 40 mmHg betragen kann [10]. Entscheidend ist die unterschiedliche Entfernung der Blutdruckmessorte von den zentralen Gefäßen. Die Höhe des systolischen Blutdrucks nimmt von der Aorta bis zur Arteria brachialis, bzw. zur Arteria poplitea stetig zu [60]. Diese sogenannte systolische Amplitudenüberhöhung findet im Rahmen der Diagnostik einer peripheren arteriellen Verschlusskrankheit (pAVK) Anwendung und wird mit dem sogenannten „Ankle-Brachial Index“ (ABI) beschrieben. Dabei weist ein  $ABI < 0,9$  auf eine relevante pAVK, ein  $ABI > 1,3$  auf eine Mediasklerose hin [67].

Compliance und Reflexionsverhalten der Blutgefäße sind keine konstanten Größen, da sich die elastischen Komponenten in der Gefäßwand altersabhängig verändern. Elastin wird dabei in der Tunica media sukzessive durch Kollagen ersetzt. Dies führt zum einen zu einem Anstieg des systolischen Blutdrucks mit zunehmenden Lebensalter [60]. Zum anderen konnten Axton et al. zeigen, dass zwischen den Blutdruckwerten an wachen Neugeborenen und Kindern bis zu einem Jahr an Oberarm und Wade kein signifikanter Unterschied bestand [68]. Dagegen waren bei Kindern zwischen einem und acht Jahren bereits Unterschiede zwischen den Messorten an Oberarm und Wade festzustellen. Schell et al. empfehlen in dieser

Altersgruppe den Unterschenkel nicht routinemäßig zur Blutdruckmessung heranzuziehen [46].

Aufgrund der vorhandenen Blutdruckdifferenzen zwischen den Messorten kommen Sareen und Moore et al. zu dem Schluss, den Unterschenkel nur dann zur oszillometrischen Blutdruckmessung heranzuziehen, wenn der Oberarm nicht zugänglich ist [57, 58]. Moore et al. schlagen zudem vor, die Unterschenkelmessung mit einer einmaligen simultanen Oberarmmessung zu vergleichen um die individuelle Differenz bei den folgenden Messungen am Unterschenkel berücksichtigen zu können. Goldstein et al. konstatierten in ihrer Arbeit zwar eine klinische, aber keine statistische Übereinstimmung für den MAP. Lediglich für den DAP konnte ein statistischer Unterschied zwischen den Messorten ausgeschlossen werden. Aufgrund der geringen therapeutischen Konsequenz des DAP lehnen die Autoren jedoch die oszillometrische Blutdruckmessung am Unterschenkel zur Therapieentscheidung ab [65].

In der vorliegenden Arbeit verhielten sich die Messwertdifferenzen der Probandengruppe in Bauchlage in etwa wie die in Rückenlage. Hier zeigte sich wiederum eine systolische Amplitudenüberhöhung an der unteren Extremität, die Differenz fiel jedoch etwas geringer aus. MAP und DAP waren am Oberarm jeweils höher als am Unterschenkel und betragsmäßig in der Größenordnung der Differenzen in Rückenlage.

Die erhebliche Abweichung des systolischen Blutdrucks am Unterschenkel vom simultan erhobenen Blutdruckwert am Oberarm und die interindividuelle Variabilität der systolischen Messwertdifferenz lässt ein frühzeitiges Erkennen einer drohenden Hypotonie anhand des systolischen Blutdruckwerts an wachen Probanden durch eine oszillometrische Blutdruckmessung am Unterschenkel auch in Bauchlagerung nicht zu. Eine notwendige Blutdrucktherapie würde nicht sicher erkannt werden und der Patient wäre dadurch gefährdet.

Wie schon in früheren Arbeiten festgestellt, liegen die Messwertdifferenzen für den MAP in der Probandengruppe innerhalb eines Bereichs von  $\pm 10$  mmHg und zeigen somit eine klinische Signifikanz [65]. Dies war sowohl in Rücken- als auch in Bauchlagerung der Fall.

## **5.2 Vergleichende Blutdruckmessung in der Patientengruppe**

Im zweiten Teil der Arbeit wurde der Frage nachgegangen, ob sich die Verhältnisse der vergleichenden Blutdruckmessung in der Probandengruppe in den klinischen Alltag übertragen lassen und eine drohende arterielle Hypotonie auch unter Allgemeinanästhesie und während intraoperativer Bauchlagerung am Unterschenkel zeitnah und akkurat

wahrgenommen werden kann. Wie in Kapitel 1.5.2 erläutert ist der Patient statistisch am häufigsten in den ersten zehn Minuten nach Narkoseinduktion durch einen Blutdruckabfall gefährdet. Dieser schlägt sich ohne suffiziente Behandlung zeitabhängig in einer erhöhten Krankenhausmorbidity und –mortality nieder [15, 21].

Mehrfach haben sich Autoren in früheren Arbeiten mit der Evaluation der oszillometrischen Blutdruckmessung am Unterschenkel anhand des Goldstandards am Oberarm unter Narkosebedingungen auseinandergesetzt.

Für den SAP sind die Ergebnisse dabei uneinheitlich. Einige Autoren konnten an der unteren Extremität einen höheren SAP als am Oberarm nachweisen [6, 69, 70, 71]. Wobei nicht alle Messungen in Allgemeinanästhesie [69, 70], sondern an unselektierten Patienten in Lokal-, Regional- und Allgemeinanästhesie [6] oder in Sedierung mit erhaltener Spontanatmung durchgeführt wurden [71]. In den Arbeiten von Short und Abou-Madi et al. wurde der SAP unter Allgemeinanästhesie dagegen am Unterschenkel niedriger als am Oberarm bestimmt [72, 73].

Der MAP zeigte bei Block et al. eine signifikante Übereinstimmung zwischen den Messorten [6], während er sich in anderen Arbeiten entweder am Unterschenkel höher als am Oberarm [71] oder genau umgekehrt verhielt [72]. Bei Lee und Howat et al. fand der MAP gar keine Berücksichtigung [69, 70].

Howat und Short et al. sehen in ihren Ergebnissen keine präzise Übereinstimmung zwischen oberer und unterer Extremität [69]. Wilkes et al. schlussfolgern, dass der Unterschenkel zur Blutdruckmessung herangezogen werden kann, wenn der Oberarm nicht zugänglich ist. Dabei sei aber die systolische Amplitudenüberhöhung am Unterschenkel zu berücksichtigen [71]. Auch Block et al. bewerten den Unterschenkel als zuverlässigen Messort, wenn initial am individuellen Patienten eine simultane Messung an beiden Manschettenlokalisationen zum Abgleich vorgenommen wird [6]. Eine vergleichende Messung in Bauchlagerung wurde bis dato aber noch nicht evaluiert.

In vorliegender Arbeit wurde die simultane oszillometrische Blutdruckmessung an 32 konsekutiven Patienten nach Narkoseinduktion in Rückenlage und während intraoperativer Bauchlagerung durchgeführt. Die Abweichung des MAP zwischen der Oberarm- und Unterschenkelmessung war unter Narkosebedingungen etwas größer als in der Probandengruppe. Die Änderung der intraoperativen Lagerung vom Rücken auf den Bauch blieb ohne Auswirkung auf die Messwertdifferenzen. Auffallend war jedoch die deutlich geringere Abweichung des systolischen Blutdrucks in der Patientengruppe zwischen der oberen und unteren Extremität, sowohl in Rücken- als auch in Bauchlage. Eine systolische Amplitudenüberhöhung, wie sie in der Probandengruppe zu beobachten war, fehlte im

Patientenkollektiv. Alle drei Blutdruckparameter waren jetzt am Unterschenkel im Gegensatz zur Probandengruppe niedriger als am Oberarm bestimmt worden.

Die Ursache für die abweichenden Ergebnisse im Patientenkollektiv von der Probandengruppe muss in der durchgeführten Allgemeinanästhesie zu suchen sein.

Sie erfolgte bei allen Patienten als opioidgestützte, balancierte Anästhesie. Allen Anästhetika gemein ist in diesem Zusammenhang ein mehr oder minder stark ausgeprägter kardiozirkulatorisch-depressiver Effekt als Nebenwirkung. Zur Narkoseinduktion wurde bei allen Patienten Propofol als Induktionshypnotikum und Sevofluran zur Aufrechterhaltung der Allgemeinanästhesie in Kombination mit Fentanyl verwendet. Neben einer partiellen Sympathikolyse mit variabler Veränderung der Herzfrequenz und Abnahme des Herzzeitvolumens verursachen diese Substanzen auch eine alphasrezeptorvermittelte Abnahme des Vasotonus in den Widerstandsgefäßen. Dadurch kommt es zu einer Zunahme der Gefäßradien mit gleichzeitiger Zunahme der Gefäßcompliance in der Peripherie des arteriellen Gefäßbaumes. Daraus resultiert wiederum ein verändertes Pulswellenverhalten.

Eine Untersuchung zur arteriellen Pulswellenanalyse von Baulmann et al. zeigte auf, dass die Pulswellenreflexion im arteriellen Gefäßbaum einen wesentlichen Einfluss auf die zentrale Hämodynamik, insbesondere auf das Pulsdruckverhalten und folglich auf den systolischen Blutdruck hat. Das Ausmaß der Reflexion ist neben anatomischen Faktoren wie der Geometrie des arteriellen Gefäßbaumes, von funktionellen Einflüssen, wie der Endothelfunktion, dem Verhältnis von Vasokonstriktion und Vasodilatation im Gefäßbaum, dem Zustand der Mikrozirkulation und generell dem Sympathotonus abhängig [60]. Auch der Zeitpunkt der Reflexion bezogen auf den Herzzyklus hat eine Auswirkung auf das Pulsdruckverhalten. Dieser wird vor allem neben der Körpergröße und dem Geschlecht durch die Herzfrequenz und insbesondere durch die Pulswellengeschwindigkeit („pulswave velocity“, PVW) bestimmt [60].

Die Pulswellengeschwindigkeit determiniert den Ort der Welleninterferenz, der nach distal laufenden Pulswelle und der nach proximal laufenden reflektierten Pulswelle. Sie ist kurzfristig durch Relaxation mittelgroßer und kleiner Arterien und Arteriolen durch vasoaktive Pharmaka beeinflussbar. Eine abnehmende Pulswellengeschwindigkeit reduziert schließlich das Ausmaß der Pulswellenreflexion [60]. Sowohl die Reduktion der Pulswellengeschwindigkeit, als auch der Pulswellenreflexion führen zu einer Abnahme des Pulsdrucks und somit zu einer Reduktion des systolischen Blutdrucks in der Gefäßperipherie. Unter Narkosebedingungen kommt es dann durch Modulation des autonomen Nervensystems und des Vasomotorentonus zu Veränderungen der arteriellen Pulswelle im Gefäßbaum. Dieser Zusammenhang kann die deutlich geringere systolische Blutdruckdifferenz zwischen

oberer und unterer Extremität in der Patientengruppe erklären. Eine systolische Amplitudenüberhöhung in der Gefäßperipherie war hier demnach nicht nachzuweisen. Diese Feststellung deckt sich auch mit den Ergebnissen von Short und Abou-Madi et al., die unter Allgemeinanästhesie keinen erhöhten systolischen Blutdruck am Unterschenkel im Vergleich zum Oberarm registrierten [72, 73].

Obwohl die Mittelwerte des SAP in der Patientengruppe nur geringfügig zwischen oberer und unterer Extremität differieren, ist der SAP als therapierelevanter Blutdruckparameter dennoch kritisch zu hinterfragen.

Der SAP ist der variabelste aller drei Blutdruckmesswerte. Er unterliegt als systolischer Spitzendruck am stärksten den Einflüssen des Gefäßsystems durch Pulswellen-Reflexion und –Interferenz. Der SAP steigt sukzessive von der Aorta bis zur Arteria brachialis, beziehungsweise zur Arteria femoralis an. Altersbedingte Gefäßpathologien wirken sich vor allem auf den SAP aus [60]. Zudem ist die Differenz des SAP zwischen Oberarm und Unterschenkel nicht konstant und damit für den individuellen Patienten vorhersagbar, sondern hochvariabel [65]. In mehreren vergleichenden Blutdruckmessungen an Patienten in Spinalanästhesie zeigte sich, dass die SAP-Differenz von der Höhe des tatsächlichen Blutdrucks abhängig war. Bei systolischen Werten  $< 100$  mmHg war der SAP an der unteren Extremität niedriger als am Oberarm und bei systolischen Werten  $> 150$  mmHg waren die Verhältnisse umgekehrt [59, 74]. Diese von der Höhe des Blutdrucks abhängige Variabilität der systolischen Messwertdifferenz kann ihre Ursache im Reflexionsverhalten der Druckpulswelle im Gefäßsystem haben, das maßgeblich von der Pulswellengeschwindigkeit (PWV) abhängt. Die PWV wiederum verändert sich mit der Höhe des Blutdrucks, da mit größerer Dehnung der Arterien auch das Elastizitätsmodul der Gefäßwand zunimmt [10]. Diese große Variabilität der systolischen Messwerte, verglichen mit dem MAP und DAP, spiegelt sich auch in den deutlich größeren Spannweiten der 95%-Übereinstimmungsgrenzen und Konfidenzintervalle der SAP-Differenzen in der Probanden- und Patientengruppe wieder.

Anders verhält es sich dagegen mit dem MAP. Die Übereinstimmung im Patientenkollektiv war etwas geringer als in der Probandengruppe, aber wiederum unabhängig von der Patientenlagerung.

Der MAP verhält sich als zeitgewichteter Mittelwert des Blutdrucks sowohl in den zentralen, als auch in den peripheren Gefäßabschnitten bemerkenswert konstant [10, 58]. Die Höhe des oszillometrisch gemessenen MAP ist folglich nahezu unabhängig von der Entfernung von den zentralen Gefäßen und damit vom Blutdruckmessort. Er unterliegt im Gegensatz zum arteriellen Spitzendruck, respektive systolischen Blutdruck, kaum den Einflüssen durch

Reflexion oder Interferenz der Pulsdruckwelle im arteriellen Gefäßbaum. Damit haben Nebenwirkungen durch Anästhetika auf das vegetative Nervensystem und den Vasomotorentonus keine klinisch relevante Auswirkung auf die Höhe des MAP im Verlauf des Gefäßsystems. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt werden. Die Übereinstimmung des MAP in Allgemeinanästhesie zwischen oberer und unterer Extremität war geringer als in der Probandengruppe. Goldstein und Block et al. definieren eine Abweichung des Messwertes innerhalb von  $\pm 10$  mmHg vom Oberarmwert als klinisch akzeptabel [6, 65]. Die Messwertedifferenzen für den MAP in der Probandengruppe, nicht jedoch des Patientenkollektivs werden dieser Forderung gerecht.

Auch die 95%-Übereinstimmungsgrenzen und Konfidenzintervalle waren in Allgemeinanästhesie etwas größer, aber vergleichbar mit denen in der Probandengruppe.

Die Messwertdifferenzen in Allgemeinanästhesie und Bauchlage zwischen Oberarm und Unterschenkel sind mit den Differenzen in Rückenlage vergleichbar. Auffallend ist dabei, dass sich die Übereinstimmungsgrenzen und Konfidenzintervalle für den SAP im Patientenkollektiv deutlich größer darstellten als in der Probandengruppe.

Bemerkenswert war zudem, dass MAP und DAP bei allen Studienteilnehmern am Unterschenkel stets niedriger als am Oberarm gemessen wurden. Dafür ursächlich ist die nach distal physiologisch abnehmende Gefäßcompliance. Sie bewirkt neben einer Zunahme der Pulswellengeschwindigkeit und des arteriellen Spitzendrucks eine Abnahme des diastolischen Blutdrucks. Ursächlich dafür ist die Abnahme der pulsatilen Speicherkapazität des Gefäßlumens bei nach peripher zunehmender Steifigkeit der Gefäßwand. Beträgt die zentrale, aortale Gefäßdilatation beim Gesunden bis zu 10 % des Gefäßlumens, so umfasst diese in der Gefäßperipherie nurmehr circa 2 - 3 % [60]. In der Diastole wird daher in der Peripherie weniger Blutvolumen aus dem dilatierten Gefäßabschnitt mobilisiert. Der diastolische Blutdruck fällt folglich in der Gefäßperipherie niedriger aus als in den zentralen Gefäßen [10].

Neben physiologischen und anatomischen Einflüssen des arteriellen Gefäßbaumes auf den Pulsdruck und das Blutdruckverhalten, spielt das eingesetzte Blutdruckmessverfahren selbst eine nicht unwesentliche Rolle für die Frage nach der Zuverlässigkeit des Messverfahrens am Unterschenkel. Die nichtinvasive, oszillometrische Blutdruckmessung weist hier jedoch Limitationen auf.

Mit dem oszillometrischen Blutdruckmessverfahren wird lediglich der mittlere arterielle Blutdruck (MAP) des Patienten als tatsächlicher Messwert erfasst. Dazu werden während der Manschetten-Deflation die vom Pulsdruck im Blutgefäß erzeugten Schwingungen auf die



Manschette übertragen und vom Blutdruckmessgerät registriert. Die maximale Schwingungsamplitude in der Blutdruckmanschette entspricht dem MAP. Es ist daher nicht verwunderlich, dass der oszillometrisch gemessene MAP - auch im Vergleich mit einer invasiven Blutdruckmessung - der Parameter mit der besten Übereinstimmung zwischen beiden Verfahren ist. Lehman et al. führten dazu an 852 Intensivpatienten simultan eine invasive Blutdruckmessung in der Arteria radialis und eine oszillometrische Blutdruckmessung am Oberarm durch. Dabei zeigte der mittlere arterielle Blutdruck die beste Übereinstimmung zwischen beiden Messverfahren. Die systolischen Messwerte unterschieden sich hingegen signifikant [61].

Der systolische und diastolische Blutdruckwert werden dagegen ausgehend von der Höhe des MAP algorithmenbasiert errechnet. Trotz der ständigen Weiterentwicklung dieses „Maximum amplitude pressure algorithm“ durch die Hersteller, bleibt die oszillometrische Bestimmung des systolischen Blutdrucks nur eine mathematische Annäherung an den tatsächlichen systolischen Blutdruckwert. Die Präzision ist von der Güte des Algorithmus abhängig. Bur et al. konnten zeigen, dass ein verbesserter Berechnungs-Algorithmus auch zu einer höheren Übereinstimmung der Messwerte zwischen oszillometrischer und invasiver Blutdruckmessung bei Blutdruckmessgeräten desselben Herstellers führen kann [62].

Von den drei Blutdruckparametern ist der MAP, als Surrogatparameter für eine adäquate Gewebeperfusion und -oxygenierung, der aussagekräftigste Messwert, um daran die perioperative Kreislauftherapie auszurichten.

Er ist neben dem HZV die maßgebliche Determinante für die Organperfusion. Zusammen mit dem systemvaskulären Widerstand und dem zentralen Venendruck definiert er nach dem Darcy-Gesetz das Blutvolumen, das ein Organ pro Zeiteinheit durchströmt [9]. Die Notwendigkeit eines ausreichend hohen MAP erklärt sich aus der Tatsache, dass bei Schwankungen des MAP die Organperfusion nur begrenzt durch reaktive Vasodilatation oder -konstriktion konstant gehalten werden kann. Eine Sonderstellung nehmen hier das Gehirn und die Nieren ein, die über eine effektive Autoregulation der Organ-Perfusion verfügen. Sie gewährleistet eine konstante Perfusion, wenn sich der MAP innerhalb eines bestimmten Druck-Bereichs befindet [9].

Patienten mit chronischer arterieller Hypertonie weisen zudem eine nach rechts verschobene Autoregulationskurve auf. Das heißt, dass die Autoregulationsgrenze der Perfusion von Gehirn und Nieren bereits unterschritten sein kann, wenn sich der MAP in einem für den Blutdruckgesunden physiologischen Bereich bewegt. Eine Lumenreduktion in den zuführenden hirnversorgenden Gefäßen durch eine Stenose der Arteria carotis oder vertebralis

verursacht einen Druckgradienten, der zu einer Reduktion des effektiven cerebralen Perfusionsdruckes führt. Ein perioperativer Abfall des MAP kann daher zu einer relevanten Abnahme des cerebralen Perfusionsdruckes mit Unterschreitung der autoregulativen Grenze führen.

Wie bereits mehrfach ausgeführt, ist der Patient am häufigsten durch eine intraoperative Hypotonie gefährdet. Neben verschiedenen anderen Risikofaktoren zeichnen hier insbesondere die Induktionshypnotika für den Blutdruckabfall – besonders in den ersten zehn Minuten der Narkose - verantwortlich. In dieser Phase muss frühzeitig mittels Volumengabe, Trendelenburglagerung oder Vasopressorthherapie gegenreguliert werden. Voraussetzung ist die zeitnahe Detektion des Ereignisses mit einem zuverlässigen Blutdruckmessverfahren.

Diese Zusammenhänge unterstreichen die Wertigkeit des MAP als den maßgebenden Parameter zur Blutdrucksteuerung. Der systolische Blutdruck lässt keine Rückschlüsse auf eine ausreichende Organperfusion zu.

Lehmann et al. konnten die Überlegenheit des MAP gegenüber dem SAP als Blutdruckparameter zur Therapiesteuerung im Hinblick auf das Patientenoutcome aufzeigen.

In einer retrospektiven Analyse an 852 Intensivpatienten wurde nachgewiesen, dass der oszillometrisch gemessene mittlere arterielle Blutdruck eine wesentlich höhere Sensitivität als der systolische Blutdruck hatte, um das Risiko eines Patienten für ein akutes Nierenversagen im Rahmen einer Hypotension abzuschätzen. Ebenso verhielt es sich im Zusammenhang mit der Sterblichkeitsrate auf der Intensivstation [61].

Der SAP ist der variabelste der drei Blutdruckparameter. Er unterliegt multiplen Einflüssen durch den arteriellen Gefäßbaum und wird mit dem oszillometrischen Messverfahren nur indirekt und damit weniger präzise als der MAP erfasst.

Trotz der signifikanten Übereinstimmung der Mittelwerte des SAP in der Patientengruppe zwischen oberer und unterer Extremität ist dieser Blutdruckparameter zur Steuerung der Kreislauftherapie anhand einer Unterschenkelmessung auch in Bauchlage aus den angeführten Gründen als unpräzise einzustufen. Dies drückt sich auch in der sehr großen Streuung der Limits und Konfidenzintervalle des SAP aus.

In einer aktuellen Arbeit lehnen Goldstein et al. die alleinige Unterschenkel-Blutdruckmessung an wachen Patienten trotz der guten Übereinstimmung der Mittelwerte auch anhand des MAP aufgrund des breiten Konfidenzintervalls und der damit einhergehenden geringen Präzision ab. Die vergleichende Blutdruckmessung erfolgte an wachen Patienten in der Notaufnahme. Aufgrund ihrer Ergebnisse stellen sie in Frage, dass

mit einer alleinigen Messung an der unteren Extremität differenzierte Therapieziele im Rahmen der Sepsis (Early-goal directed therapy,  $\text{MAP} \geq 65 \text{ mmHg}$ ), beim akuten Koronarsyndrom mit Lysetherapie ( $\text{SAP} < 180 \text{ mmHg}$ ) oder bei einer unkontrollierbaren Blutungsquelle (Damage control resuscitation,  $\text{MAP} 50 - 65 \text{ mmHg}$ ) erkannt werden können. Sie schlussfolgern daher, dass die Unterschenkelmessung den Goldstandard am Oberarm nicht gleichwertig ersetzen kann [65].

Die Autoren um Block et al. stufen den MAP dagegen als akzeptablen Blutdruckparameter bei der intraoperativen Blutdruckmessung über der Wade im Vergleich zur Oberarmmessung ein [65].

Die Messwertdifferenzen im Patientenkollektiv unter Allgemeinanästhesie für den MAP sind klinisch und statistisch signifikant, der Bias und die Übereinstimmungsgrenzen spiegeln zudem eine geringe Präzision wieder.

Die oszillometrische Blutdruckmessung am Unterschenkel kann daher auch unter Narkosebedingungen und während intraoperativer Bauchlage den Goldstandard am Oberarm nicht gleichwertig ersetzen.

Berücksichtigt man jedoch die Therapieschwelle einer intraoperativen Hypotension in einer kürzlich publizierten Arbeit ( $\text{MAP} < 60 \text{ mmHg}$  bzw.  $\text{MAP} < 30 \%$  des Ausgangswert beim Hypertoniker) [9], kann der am Unterschenkel gemessene MAP eine mögliche Gefährdung des Patienten durch eine unterlassene Kreislauftherapie durchaus detektieren. Die Tatsache, dass der MAP am Unterschenkel bei allen Studienteilnehmern stets niedriger als am Oberarm gemessen wurde, legt sogar den Schluss nahe, dass ein bedrohlicher Blutdruckabfall über der Arteria tibialis posterior anhand des MAP eher als mit der Oberarmmessung registriert werden kann. Da neben der Ausprägung einer intraoperativen Hypotonie auch die Zeitdauer des Ereignisses für das Patientenoutcome relevant ist, würde die Patientensicherheit durch ein frühzeitigeres Erkennen eines Blutdruckabfalls sogar noch erhöht [9].

Diese Überlegungen decken sich mit der Arbeit von Lakhal et al. Sie konnten an 150 Intensivpatienten in einer prospektiven Beobachtungsstudie zeigen, dass der oszillometrisch gemessene MAP am Unterschenkel genauso zuverlässig in der Lage war eine Hypotension ( $\text{MAP}$  kleiner  $65 \text{ mmHg}$ ) zu detektieren, wie der invasiv gemessene Wert [63].

Die Allgemeinanästhesie hat in dieser Arbeit eine relevante Auswirkung auf die Messwertdifferenzen für den SAP, nicht jedoch auf den MAP bei der vergleichenden Blutdruckmessung zwischen oberer und unterer Extremität.

Folglich kann bei Patienten in Allgemeinanästhesie und während intraoperativer Bauchlagerung die oszillometrische Blutdruckmessung auch am Unterschenkel etabliert werden, um eine Hypotonie zeitgerecht zu erfassen. Diese Empfehlung gilt jedoch nur, wenn

der Oberarm zur Blutdruckmessung nicht zugänglich ist. Der MAP ist dem SAP aus physiologischen und messtechnischen Gründen als therapierelevanter Messwert überlegen und daher als maßgeblicher Blutdruckparameter während der intraoperativen Patientenüberwachung zu favorisieren.

### **Limitationen**

Die Studienteilnehmer wurden sorgfältig ausgewählt und die Messungen stets mit denselben Blutdruckmessgeräten durchgeführt. Trotzdem unterschieden sich die Probanden- und Patientengruppen in wenigen Punkten, die jeweils einen Einfluss auf das Messergebnis haben können.

Das durchschnittliche Alter der Patientengruppe ist höher als in der Probandengruppe ( $56 \pm 15$  versus  $31 \pm 9$  Jahre). Mit steigendem Alter nimmt die Gefäßsteifigkeit stetig zu [60]. Dies zeigt sich in einer nichtlinearen Zunahme der Pulswellengeschwindigkeit auf mehr als das Zweifache des Werts eines jungen Probanden. Die Folge ist eine Zunahme des Pulsdrucks, des systolischen Blutdrucks und eine Abnahme des diastolischen Blutdrucks. Trotzdem war der systolische Blutdruck unter Narkosebedingungen in der Patientengruppe am Unterschenkel niedriger als in der Probandengruppe bestimmt worden.

Des Weiteren wurden in der Patientengruppe regelmäßig Antihypertensiva eingenommen, in der Probandengruppe war dies nur bei einem Studienteilnehmer der Fall. Während Calciumantagonisten und Pharmaka mit Wirkung auf das Renin-Angiotensin-Aldosteron-System zu einer Abnahme der Pulsdruckwelle und somit des systolischen Blutdrucks führen, können  $\beta$ -Blocker durch Reduktion der Herzfrequenz mit folglichem Zunahme der Systolendauer zu einem verzögerten Eintreffen der reflektierten Pulswelle in der späten Systole führen. Dadurch ist eine Zunahme der Pulsdruckamplifikation in den zentralen Gefäßen möglich. Die Einnahme von Antihypertensiva kann einen Einfluss auf die periphere Pulswellengeschwindigkeit und –reflexion und somit auch auf die vergleichende oszillometrische Blutdruckmessung haben.

Im Rahmen der Studie wurden Blutdruckmessgeräte zweier verschiedener Hersteller verwendet. Daher sind die in den Geräten hinterlegten Algorithmen zur Berechnung der systolischen und diastolischen Blutdruckwerte nicht identisch. Beide Messgeräte wurden jedoch in Studien auf ihre Messpräzision hin überprüft und wiesen innerhalb der von der „Association for the Advancement of Medical Instrumentation“ geforderten engen Grenzen ( $5 \pm 8$  mmHg; [MW  $\pm$  SD]) keine Unterschiede hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit auf [51, 52, 53].

Was die Anzahl der Studienteilnehmer angeht, bewegt sie sich in der Größenordnung vorhergehender Arbeiten zur vergleichenden Blutdruckmessung. Die Fallzahl reicht jedoch nicht aus, um eine völlig verlässliche Aussage zur vergleichenden oszillometrischen Blutdruckmessung an der oberen und unteren Extremität in Allgemeinanästhesie treffen zu können.

### **Ausblick**

Die Folgeschäden der chronischen arteriellen Hypertonie betreffen insbesondere die arterielle Endstrombahn, in erster Linie die Organe mit hoher Ruheperfusion, wie Gehirn und Nieren [60]. Entscheidend ist dabei die Höhe des arteriellen Spitzendrucks, also des systolischen Blutdrucks. Interventionsgrenzen für eine erforderliche Therapie der arteriellen Hypertonie sind evidenzbasiert in den anerkannten Leitlinien formuliert und orientieren sich daher am systolischen arteriellen Blutdruck [11].

Die perioperative Hypotension geht dagegen mit einer Organminderperfusion und dem Risiko einer Ischämie mit folgender Organdysfunktion einher. Die regionale Perfusion wird durch den vaskulären Widerstand und den MAP definiert. Der MAP muss daher bei der Steuerung der perioperativen Kreislauftherapie in den Fokus des Anästhesisten rücken und den systolischen Blutdruck als maßgebenden Blutdruckparameter ablösen. Die Festlegung von Blutdruckgrenzwerten, die eine intraoperative Therapie erforderlich machen, muss sich immer am individuellen Patienten und seinem präoperativen Blutdruckverhalten orientieren. Maßgeblich ist dabei wiederum der mittlere arterielle Blutdruck.

## **6. Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die nichtinvasive oszillometrische Blutdruckmessung ist das dominierende Verfahren im Rahmen der perioperativen Kreislaufüberwachung. Dabei erfolgt die Blutdruckmessung mittels pneumatischer Manschette standardmäßig am Oberarm des Patienten. In der klinischen Routine, insbesondere im Rahmen des intraoperativen Patientenmonitorings ist die oszillometrische Blutdruckmessung über der Arteria brachialis jedoch nicht immer möglich. Wenn eine invasive Blutdruckmessung nicht indiziert ist, erfordert die Notwendigkeit einer lückenlosen Blutdruckmessung die Auswahl eines alternativen Messortes am Patienten. Da intraoperative hämodynamische Veränderungen eine relevante Auswirkung auf die perioperative Morbidität und Mortalität des Patienten haben, müssen sie zeitnah und mit ausreichender Messpräzision erfasst werden. Es ist daher notwendig, dass die oszillometrische Blutdruckmessung an einem alternativen Messort die Messpräzision des etablierten Goldstandards am Oberarm vorweisen kann und eine drohende Hypotonie rechtzeitig erfasst. Vergleichende Blutdruckmessungen mit diesem Messverfahren wurden bereits an wachen Probanden und Patienten in Allgemein- und Regionalanästhesie an Oberarm und Unterschenkel durchgeführt. Nicht selten ist intraoperativ jedoch eine der Operation angepassten Patientenlagerung erforderlich. Die Evaluation der oszillometrischen Blutdruckmessung am Unterschenkel anhand des etablierten Standards am Oberarm bei Patienten unter Allgemeinanästhesie und unter Berücksichtigung der intraoperativen Lagerung, fehlte aber bis jetzt.

In der vorliegenden Arbeit wurden an wachen Probanden und Patienten in Allgemeinanästhesie 252 simultane oszillometrische Blutdruckmessungen am Oberarm, über der Arteria brachialis und am Unterschenkel über der Arteria tibialis posterior durchgeführt. Dazu konnten 31 Probanden ( $31 \pm 9$  Jahre, 20 weiblich, 11 männlich) und 32 Patienten ( $56 \pm 15$  Jahre, 17 weiblich, 15 männlich) in die Studie eingeschlossen werden. Die Messungen erfolgten sowohl in Rücken- als auch in Bauchlage. In der Patientengruppe fand die vergleichende Blutdruckmessung unter Allgemeinanästhesiebedingungen statt. Aus den Mittelwerten der einzelnen Messungen wurden die Differenzen zwischen der Oberarm- und Unterschenkelmessung berechnet, sowie die Standardabweichungen der Differenzen und die 95%-Konfidenzintervalle bestimmt. Die Signifikanzberechnung erfolgte mit dem Student t-Test, ein p-Wert  $< 0,05$  galt dabei als statistisch signifikant. Die zusammengehörenden Messwertepaare wurden in Streudiagrammen graphisch dargestellt und die Korrelationskoeffizienten berechnet. Mit Hilfe der Bland-Altman Analyse wurde außerdem die Streuung der Messwerte um die Mittelwerte berücksichtigt.

In der Probandengruppe konnten die Ergebnisse früherer Arbeiten reproduziert werden. Von den drei erhobenen Blutdruck-Parametern zeigte der mittlere arterielle Blutdruck (MAP) die größte Übereinstimmung zwischen der Messung am Oberarm und am Unterschenkel. Dies war sowohl in Rücken- ( $5 \pm 6$  mmHg,  $p < 0,01$ ) als auch in Bauchlage ( $9 \pm 8$  mmHg,  $p < 0,01$ ) der Fall. Der systolische Blutdruck (SAP) war in der Probandengruppe am Unterschenkel deutlich höher als am Oberarm bestimmt worden. Dies spiegelt die physiologische Amplitudenüberhöhung an der unteren Extremität wieder.

In der Patientengruppe war die Differenz des MAP zwischen oberer und unterer Extremität in Rücken- ( $14 \pm 11$  mmHg,  $p < 0,01$ ) und Bauchlage ( $13 \pm 9$  mmHg,  $p < 0,01$ ) in der Größenordnung wie in der Probandengruppe. Der SAP zeigte unter Allgemeinanästhesie eine geringere Differenz in Rücken- ( $3 \pm 16$  mmHg,  $p = 0,3$ ) und Bauchlage ( $5 \pm 16$  mmHg,  $p = 0,7$ ) zwischen den beiden Messorten als in der Probandengruppe. Die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen waren unabhängig von der Lagerung. Sie sind deshalb am ehesten auf die Allgemeinanästhesie im Patientenkollektiv zurückzuführen.

Anästhetika mit ihren kreislaufwirksamen Nebenwirkungen führen zu Veränderungen des Pulsdruckverhaltens im arteriellen Gefäßsystem. Die Modulation des autonomen Nervensystems und des Vasomotorentonus führen zu veränderter Reflexion und Interferenz der Pulsdruckwelle und reduzieren den arteriellen Spitzendruck in der Gefäßperipherie. Der SAP ist dadurch aber auch der variabelste aller Blutdruckparameter im Verlauf des arteriellen Gefäßbaumes. Außerdem wird dieser durch das oszillometrische Messverfahren nur indirekt und damit weniger präzise als der mittlere arterielle Blutdruck bestimmt. Dies drückt sich in den größeren Streuungen und Konfidenzintervallen der Messwertdifferenzen des SAP im Vergleich zum MAP aus.

Die Messwertdifferenzen des MAP waren unabhängig von einer durchgeführten Allgemeinanästhesie bei allen Studienteilnehmern relativ konstant ( $\Delta$ MAP: 5 – 14 mmHg).

Die Differenzen und Varianzen der erhobenen Messwerte am Oberarm und Unterschenkel in Rücken- und Bauchlage machen deutlich, dass eine oszillometrische Blutdruckmessung am Unterschenkel den etablierten Standard am Oberarm nicht ersetzen kann. Eine routinemäßige nichtinvasive oszillometrische Blutdruckmessung am Unterschenkel sowohl in Bauch- als auch in Rückenlage wird daher nicht empfohlen.

Unter Berücksichtigung der in der aktuellen Literatur angegebenen Definition einer intraoperativen Hypotension (MAP  $< 60$  mmHg, oder  $< 30$  % des Ausgangswerts bei Hypertonikern) ist der MAP am Unterschenkel jedoch in der Lage eine bedrohliche Blutdruckschwankung während einer Allgemeinanästhesie rechtzeitig zu erkennen.

Da der MAP am Unterschenkel bei allen Studienteilnehmern stets niedriger als am Oberarm gemessen wurde, kann eine drohende Hypotension nichtinvasiv oszillometrisch am Unterschenkel unter Umständen sogar eher als am Oberarm detektiert werden. Dies war unabhängig davon, ob sich die Studienteilnehmer in Rücken- oder Bauchlagerung befanden. Der mittlere arterielle Blutdruck ist die maßgebliche Determinante der regionalen Organperfusion. Daher muss er als intraoperativer, therapierelevanter Kreislaufparameter mehr in den Fokus des Anästhesisten rücken und den systolischen Blutdruck in dieser Rolle ablösen.



## **6. Literaturverzeichnis**

- 1 Schell K., Bradley E., Bucher L., Seckel M., Lyons D., Wakai S., Bartell D., Carson E., Chichester E., Foraker T., Simpson K. Clinical Comparison of Automatic, Noninvasive Measurements of Blood Pressure in the Forearm and Upper Arm. *Am J Crit Care* 2005; 14:232-241.
- 2 Schell K., Morse K., Waterhouse K. Forearm and upper-arm oscillometric blood pressure comparison in acutely ill adults. *West J Nurs Res.* 2010; 32: 322-340.
- 3 Thomas G. Pickering, John E. Hall, Lawrence J. Appel, Bonita E. Falkner, John Graves, Martha N. Hill, Daniel W. Jones, Theodore Kurtz, Sheldon G. Sheps and Edward J. Roccella Recommendations for Blood Pressure Measurement in Humans and Experimental Animals : Part 1: Blood Pressure Measurement in Humans: A Statement for Professionals From the Subcommittee of Professional and Public Education of the American Heart Association Council on High Blood Pressure Research. *Hypertension* 2005; 45:142-161.
- 4 Harvey W. *Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus.* 8. Auflage. Springfield, Illinois, Baltimore, Maryland: Charles C. Thomas Verlag; 1928.
- 5 Briet M., Boutouyrie P., Laurent S., London G. M. Arterial Stiffness and pulse pressure in CKD und ESRD. *Kidney International* 2012; 82: 388-400.
- 6 Block F., Schulte G. Ankle blood pressure measurement, an acceptable alternative to arm measurements. *International Journal of Clinical Monitoring and Computing* 1996; 13: 167-171.
- 7 Silbernagl S., Despopoulos A. *Taschenatlas der Physiologie.* 5. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2000.
- 8 Hintzenstern U., Sakka S.G. *Praxisbuch invasives hämodynamisches Monitoring.* 1. Auflage. München: Elsevier Verlag; 2006.

- 9 Weyland A., Grüne F. Intraoperative Hypotension – na und? Deutsche Akademie für Anästhesiologische Fortbildung, 1. Auflage. Göttingen: Aktiv Druck & Verlag; 2012
- 10 Schmidt R. F., Thews G. Physiologie des Menschen. 27. Auflage. Berlin: Springer-Verlag; 1997.
- 11 Leitlinien zur Behandlung der arteriellen Hypertonie, Deutsche Hochdruckliga e.V. DHL - Deutsche Hypertonie Gesellschaft 2008, AWMF Register-Nr: 0046/001.
- 12 Ritter M. A., Nabavi D. G., Ringelstein E. B. Messung des arteriellen Blutdrucks. Dt. Ärzteblatt 2007; 104:1406-1410.
- 13 Monk T., Saini V., Weldon C., Sigl C. Anesthetic Management and One-Year Mortality After Noncardiac Surgery. Anesth Analg 2005; 100:4–10.
- 14 Kheterpal S., O'Reilly M., Englesbe M. J., Rosenbarg A. L., Shanks A. M., Zhang L., Rothman E.D., Campbell D. A., Tremper K. K. Preoperative and intraoperative predictors of cardiac adverse events after general, vascular, and urological surgery. Anesthesiology 2009; 110:58-66.
- 15 Reich D. L., Hossain S., Krol M., Baez B., Patel P., Bernstein A., Bodian C. A. Predictors of Hypotension After Induction of General Anaesthesia. Anesth Analg 2005; 101:622-628.
- 16 Reich D. L., Bennett-Guerrero E., Bodian C. A., Hossain S., Winfree W., Krol M. Intraoperative Tachycardia and Hypertension Are Independently Associated with Adverse Outcome in Noncardiac Surgery of long Duration. Anesth Analg 2002; 95:273-277.
- 17 Charlson M. E., MacKenzie C. R., Gold J. P., Ales K. L., Topkins M., Shires G. T. Intraoperative Blood Pressure: What Patterns Identify Patients at Risk for Postoperative Complications? Ann. Surg. 1990; 212:567-580.

- 18 Charlson M. E., Mackenzie C. R., Gold J. P., Ales K. L., Topkins M., Fairclough G. P., Shires G. T. The Preoperative and Intraoperative Hemodynamic Predictors of Postoperative Myocardial Infarction or Ischemia in Patients Undergoing Noncardiac Surgery. *Ann. Surg.* 1989; 210:637-648.
- 19 Bijker J. B., van Klei W. A., Kappen T. H., van Wolfswinkel L., Moons K., Kalkman J. Incidence of Intraoperative Hypotension as a Function of the Chosen Definition. *Anesthesiology* 2007; 107:213–220.
- 20 Seeling M., Papkalla N., Radtke F., Franck M., Spies C. Die Inzidenz der intraoperativen Hypotension variiert stark in Abhängigkeit von der gewählten Definition. *A&I online* 2008, (Abstract DAC 2008; PO 3.1.3)
- 21 Hug C., McLeskey C., Nahrwold M., Roizen M., Stanley T., Thisted R., Walawander C., White P., Apfelbaum J., Grasela T. Hemodynamic effects of propofol: data from over 25,000 patients. *Anesth Analg.* 1993; 77:21-29.
- 22 Kochs E., Adams H.A., Spies C. *Anästhesiologie*, 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2009.
- 23 Bharti N., Chari P., Kumar P. Effect of sevoflurane versus propofol-based anesthesia on the hemodynamic response and recovery characteristics in patients undergoing microlaryngeal surgery. *Saudi J Anaesth.* 2012; 4: 380–384.
- 24 Larsen A. *Anästhesie*. 7. Auflage. München: Urban & Fischer; 2007.
- 25 Riva-Rocci S. Un nuovo Sifigmomanometro. *Gazz Med Torino* 1896; 47:981-996.
- 26 Von Recklinghausen H. Über Blutdruckmessung beim Menschen. *Arch Exper Path u Pharmacol.* 1901; 46:78-132.
- 27 O'Brien E. Has conventional sphygmomanometry ended with the banning of mercury? *Blood pressure monit* 2002; 7:37-40.

- 28 Hunyor SN, Flynn JM., Cochineas C. Comparison of performance of various sphygmomanometers with intra-arterial blood-pressure readings. *Br Med J.* 1978; 2:159-162.
- 29 Tholl U., Forstner K., Anlauf M. Measuring blood pressure: pitfalls and recommendations. *Nephrol Dial Transplant* 2004; 19:766-769.
- 30 Lee C., Park H., Shin H., Moon J., Hong Y., Kim N., Ha I., Chang M., Won K. Oh Validation study of the Dinamap ProCare 200 upper arm blood pressure monitor in children and adolescents. *Korean J Pediatr* 2011; 54:463-469.
- 31 Korotkoff NS. On methods of studying blood pressure. *Bull Imperial Mil Med Acad* 1905; 11:365-367.
- 32 Amoores JN Oscillometric sphygmomanometers: a critical appraisal of current technology. *Blood Press Monit.* 2012; 17:80-88.
- 33 Scholz J., Seifried P., Böttiger B., Dörger V. Notfallmedizin. 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2012.
- 34 Roewer N., Thiel H. Taschenatlas der Anästhesie. 4. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2010.
- 35 Schulte J., Kochs E., Bause H. Anästhesie und Intensivmedizin. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2002.
- 36 Pression M., Sang V. Physiologie Experimentale, 2. Auflage. Paris; 1876.
- 37 Forster F., Turney D. Oscillometric determination of diastolic, mean and systolic blood pressure – a numerical model. *Journal of Biomechanical Engineering* 1986; 108: 359-364.
- 38 Kolluri S., Hersh L., Medero R. Oscillometric determination of blood pressure. US patent 6,893,403. 2005 May 25

- 39 Stebor A. GE Dinamap SuperSTAT Non-Invasive Blood Pressure Algorithm in the CARESCAPE V100 Monitor. 2008 General Electric Company, 8200 West Tower Avenue, Milwaukee, WI 53223 USA
- 40 Babbs C. Oscillometric measurement of systolic and diastolic blood pressures validated in a physiologic mathematical model. *Biomedical Engineering OnLine* 2012; 11:11-56.
- 41 Geddes L., Whistler S. The Error in indirect blood pressure measurement with the incorrect size cuff. *American Heart Journal* 1978; 96: 4-8.
- 42 Marks L. A., Groch A. Optimizing cuff width for non-invasive measurement of blood pressure. *Blood Press Monit.* 2000, 5:153-158.
- 43 Manning D. M., Kuchirka C., Kaminski J. Miscuffing: Inappropriate Blood Pressure Cuff Application. *Circulation* 1983; 68:763-766.
- 44 The Task Force for the Management of Arterial Hypertension of the European Society of Hypertension (ESH) and of the European Society of Cardiology (ESC) 2007 Guidelines for the management of arterial hypertension. *European Heart Journal* 2007; 28:1462–1536.
- 45 Lane D, Beevers M, Barnes N, Bourne J, John A, Malins S, Beevers DG Inter-arm differences in blood pressure: when are they clinically significant? *J Hypertens.* 2002; 20:1089 –1095.
- 46 Schell K., Briening E., Lebet R., Pruden K., Rawheiser S., Jackson B. Comparison of Arm and Calf Automatic, Noninvasive Blood Pressures In Pediatric Intensive Care Patients. *J Pediatr Nurs.* 2011; 26: 3–12.
- 47 Lakhal K., Macq C., Ehrmann S., Boulain T., Capdevila X. Noninvasive monitoring of blood pressure in the critically ill: reliability according to the cuff site (arm, thigh, or ankle) *Crit Care Med.* 2012; 40:1207-1213.

- 48 Kunk R., McCain G. C. Comparison of upper arm and calf oscillometric blood pressure measurement in preterm infants. *J Peritanol.* 1996; 16:89-92.
- 49 User manual Lifescope I Bedsidemonitor BSM 2301. Nihon Kohden Corp., Tokio, Japan
- 50 Solar 8000i Patient Monitor Operator's Manual. GE Medical Systems, Freiburg, Deutschland
- 51 Association for the Advancement of Medical Instrumentation  
1110 N. Glebe Road, Suite 220 Arlington, VA 22201-4795, 2003; ANSI/AAMI SP10:2002 & ANSI/AAMI SP10:2002/A1:2003
- 52 Yoshifumi Tokunaga. NKC Technical Notes Nihon Kohden Difference of NIBP measured by patient monitor and sphygmomanometer. August 2012 – Vol. 1016
- 53 Stebor A., Mikhail R.F. An Accuracy Study for the DINAMAP SuperSTAT Non-invasive Blood Pressure (NIBP) Technology – Adult/Pediatric Population. 2007 GE Healthcare Milwaukee, WI 53223 USA
- 54 Bland J., Altman D. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet* 1986; 1:307-310.
- 55 Saklad M. Grading of patients for surgical procedures. *Anesthesiology* 1941; 2:281-284.
- 56 Gottschalk A., Van Aken H., Zenz M., Standl T. Ist Anästhesie gefährlich? *Deutsches Ärzteblatt* 2011; 27:469-474.
- 57 Moore C., Dobson A., Kinagi M., Dillon B. Comparison of blood pressure measured at the arm, ankle and calf. *Anesthesia* 2008; 63:1327-1331.
- 58 Sareen P., Saxena K., Sareen B., Taneja B. Comparison of arm and calf blood pressure. *Indian Journal of Anaesthesia* 2012; 56: 83-85.

- 59 Drake M., Hill J. Observational study comparing non-invasive blood pressure measurement at the arm and ankle during caesarean section. *Anaesthesia* 2013; 68: 461-466.
- 60 Baulmann J., Nürnberger J., Slany J., Schmieder R., Schmidt-Trucksäss A., Baumgart D., Cremerius P., Hess O., Mortensen K., Weber T. Arterielle Gefäßsteifigkeit und Pulswellenanalyse – Positinspapier zu Grundlagen, Methodik, Beeinflussbarkeit und Ergebnisinterpretation. *Deutsche Medizinische Wochenschrift* 2010; 135:4-14.
- 61 Lehman L., Saeed M., Talmor D., Mark R., Malhotra A. Methods of blood pressure measurement in the ICU. *Critical Care Medicine* 2013; 41: 34-40.
- 62 Bur A., Herkner H., Vlcek M., Woisetschlager C., Derhaschnig U., Delle Karth G., Laggner A., Hirschl M. Factors influencing the accuracy of oscillometric blood pressure measurement in critically ill patients. *Critical Care Medicine* 2003; 31:793-799.
- 63 Lakhal K., Macq C., Ehrmann S., Boulain T., Capdevila X. Noninvasive monitoring of blood pressure in the critically ill: reliability according to the cuff site (arm, thigh, or ankle). *Critical Care Medicine* 2012; 40: 1207-1213.
- 64 Grouven U., Bender R., Ziegler A., Lange S. Vergleich von Messmethoden. *Deutsche Medizinische Wochenschrift* 2007; 132: e69-e73.
- 65 Goldstein L., Wells M., Sliwa K. Blood pressure measurements in the ankle are not equivalent to blood pressure measurements in the arm. *South African Medical Journal* 2014; 104:869-873.
- 66 Burdick W, Clarke N, Garlichs R. Differences in blood pressure in the arm and leg in normal subjects. *Am J Physiol* 1925; 72:169-176.

- 67 Nelson M., Quinn S., Winzenberg T., Howes F., Shiel L., Reid C. Ankle-Brachial Index determination and peripheral arterial disease diagnosis by an oscillometric blood pressure device in primary care: validation and diagnostic accuracy study. *BMJ* 2012; 2:e001689.
- 68 Axton S., Smith L., Bertrand S., Liehr P. Comparison of brachial and calf blood pressure in infants. *Pediatr Nurs* 1995; 21:323-326.
- 69 Lee J., Kim J., Ahn K., Kim C., Kang K., Chung J., Chung J., Yoo S. Study for the discrepancy of arterial blood pressure in accordance with method, age, body part of measurement during general anesthesia using sevoflurane. *Korean J Anesthesiol* 2011; 60: 323-328.
- 70 Howat D., Osborn J. Brachial and crural blood pressure during general anaesthesia. *Anaesthesia* 1970; 25:177-183.
- 71 Wilkes J., DiPalma J. Brachial blood pressure monitoring versus ankle monitoring during colonoscopy. *Southern Medical Journal* 2004; 97:939-941.
- 72 Short J. Noninvasive blood pressure measurement in the upper and lower limbs of anaesthetized children. *Paediatric Anaesthesia* 2000; 10: 591-593.
- 73 Abou-Madi M, Lenis S, Archer D, Ravussin P, Trop D. Comparison of direct blood pressure measurements at the radial and dorsalis pedis arteries during sodium nitroprusside-and isoflurane- induced hypotension. *Anesthesiology* 1986; 65: 692-695.
- 74 Sanghera S, North A, Abernethy S, et al. Arm and ankle blood pressure during caesarean section. *Int J Obstet Anesth* 2006; 15:24-27.



## 7. Anhang

### 7.1 Messwerte

Rückenlage 1. Messung								Rückenlage 2. Messung							
Ober arm			Bein					Ober arm			Bein				
Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2	Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2
117	68	78	119	55	67	73	97	111	66	73	116	53	65	68	98
127	82	91	144	57	84	75	98	117	76	87	144	59	81	74	98
96	69	76	115	62	76	72	100	97	68	79	125	57	81	73	100
122	79	86	140	69	89	62	98	111	75	102	147	60	74	61	99
109	66	79	123	50	64	64	99	103	63	71	121	48	67	55	99
111	65	77	119	53	69	75	98	118	72	86	118	59	75	80	98
120	88	99	131	73	97	91	100	118	82	93	124	70	99	93	99
113	67	80	136	58	80	70	98	114	71	84	138	64	75	68	95
121	74	92	125	66	80	72	97	125	72	83	128	60	80	70	95
130	75	92	147	57	69	74	99	124	70	86	143	58	79	75	98
109	59	75	121	43	61	61	98	104	56	63	121	41	64	60	99
122	70	82	136	55	68	67	99	115	66	80	123	43	78	69	99
108	69	76	129	54	69	67	99	101	59	70	132	45	67	65	99
121	76	83	156	56	82	68	97	131	74	86	159	53	73	64	97
129	76	88	149	58	72	65	98	124	69	87	137	63	75	65	98
118	75	90	127	60	76	73	97	124	74	84	122	62	78	76	96
120	61	83	152	68	89	68	99	109	67	85	137	62	84	63	98
143	81	98	157	70	108	107	99	133	81	91	147	65	96	106	100
132	71	78	127	66	86	84	97	127	71	92	127	63	74	80	97
137	61	90	126	59	75	78	97	141	72	79	123	68	84	76	98
122	72	80	146	57	74	67	98	121	68	86	139	53	74	62	98
132	89	102	142	87	107	77	97	141	93	106	141	92	107	80	98
130	93	107	149	83	95	88	95	148	92	100	155	82	115	81	94
133	61	86	141	66	90	63	96	134	65	86	144	67	83	58	97
140	48	82	148	51	80	65	97	146	49	81	151	47	76	63	98
124	74	79	136	66	77	60	98	139	81	91	148	74	94	63	96
140	85	98	170	61	87	60	98	137	80	95	163	62	79	55	98
115	79	93	129	57	70	66	99	121	77	91	125	61	79	66	97
129	75	102	135	67	94	78	96	124	83	99	138	72	92	77	96
118	86	94	135	69	94	76	97	119	76	85	129	65	94	81	97
122	75	82	147	64	100	74	96	127	77	91	160	68	82	73	96

Tabelle 16: Messwerte Probanden in Rückenlage

Bauchlage 1. Messung								Bauchlage 2. Messung							
Ober arm			Bein					Ober arm			Bein				
Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2	Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2
113	64	73	108	49	82	70	98	114	66	82	107	58	63	75	99
128	83	92	143	65	88	70	98	126	85	97	143	68	87	71	99
115	71	78	116	63	91	80	100	106	79	86	116	60	90	80	100
125	81	90	139	59	81	60	100	117	84	91	133	63	82	60	100
109	64	78	116	52	73	60	99	108	64	79	112	50	66	64	99
115	73	87	121	59	74	74	98	107	73	87	108	61	74	74	99
117	82	94	118	64	91	85	98	119	85	94	116	66	90	90	98
124	81	93	126	59	98	65	96	118	80	85	131	58	98	56	96
124	69	82	112	60	81	77	98	126	75	85	110	60	75	78	98
121	69	96	145	56	81	75	97	118	72	83	135	56	68	77	98
114	61	78	107	36	63	58	95	111	61	72	105	41	57	57	98
120	69	84	123	49	67	60	100	116	68	84	116	48	68	60	100
109	61	72	113	49	60	63	98	101	62	73	114	48	62	68	98
123	75	86	162	49	87	73	97	125	75	83	158	50	94	70	97
132	79	93	148	55	75	63	98	124	74	89	140	59	75	64	98
125	80	92	127	55	77	68	97	128	84	97	129	57	75	68	98
121	63	79	130	46	74	60	98	125	66	75	121	49	80	70	98
127	78	98	128	64	89	101	100	132	77	97	134	62	94	105	100
129	78	90	131	70	89	80	96	117	79	90	125	69	83	83	96
125	77	94	135	66	90	78	97	123	74	91	134	69	83	76	98
120	72	84	134	57	81	63	96	117	72	84	133	54	74	63	97
145	92	105	133	81	94	89	97	137	88	106	138	76	97	77	98
132	92	102	153	80	97	84	95	141	95	106	152	80	96	83	95
130	70	93	148	62	89	55	98	130	67	91	140	58	82	56	97
150	54	90	138	37	59	57	97	152	52	94	137	40	68	58	97
131	82	95	143	59	85	60	97	138	84	88	136	62	78	60	97
120	79	89	158	57	76	57	96	135	79	87	155	56	81	60	98
117	75	81	119	57	76	62	98	119	79	95	120	61	69	66	98
126	75	85	125	60	83	80	97	123	82	98	119	68	85	78	98
138	80	117	124	72	98	76	96	124	91	108	124	70	88	81	95
122	79	87	141	64	78	73	96	127	81	92	147	61	87	74	96

Tabelle 17: Messwerte Probanden in Bauchlage

Rückenlage 1. Messung								Rückenlage 2. Messung							
Ober arm			Bein					Ober arm			Bein				
Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2	Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2
100	49	63	101	60	74	66	98	142	77	103	131	60	78	60	98
108	53	75	130	52	72	55	99	106	55	75	131	52	74	51	99
144	83	107	120	61	82	85	99	148	81	108	117	61	83	81	98
114	60	80	97	53	72	67	99	108	59	78	87	44	59	63	99
118	70	88	112	52	77	100	99	105	63	77	93	38	63	98	98
113	60	81	118	50	73	90	100	102	58	75	91	48	62	64	100
105	62	68	85	32	51	62	98	98	55	71	82	27	49	62	98
122	62	86	132	43	66	57	100	112	59	80	125	42	61	46	99
115	73	89	99	56	76	76	100	123	66	89	101	60	72	71	99
159	72	104	179	57	78	57	100	164	73	105	184	53	85	60	99
78	51	59	89	47	65	66	100	66	44	51	83	44	63	55	100
166	110	135	166	79	93	66	97	142	67	97	128	73	83	64	99
161	73	105	145	73	97	61	100	114	58	82	106	46	60	61	99
108	66	73	107	50	64	60	98	97	61	73	84	37	51	61	97
91	56	68	106	22	57	65	99	94	56	70	91	33	62	64	99
134	89	107	158	100	121	66	99	145	88	109	177	86	108	84	98
125	59	85	137	58	78	77	97	108	59	79	95	49	60	70	96
153	70	100	101	41	59	65	99	149	67	96	103	40	58	65	99
94	52	68	100	42	70	51	99	111	60	81	112	45	75	55	100
127	68	91	120	62	82	76	100	123	61	85	113	55	75	87	98
98	58	73	97	47	59	80	98	98	60	74	104	39	60	81	98
188	86	123	165	59	82	54	100	181	81	117	160	54	87	50	99
147	85	108	137	61	76	60	99	112	62	80	114	63	77	71	98
117	64	85	104	47	61	71	99	113	67	83	100	42	58	74	99
119	81	96	145	46	99	77	99	134	81	102	157	75	111	74	99
113	58	79	114	50	65	64	98	134	83	102	147	75	89	72	97
102	58	73	98	40	61	67	100	111	68	83	106	51	65	70	99
159	84	112	153	60	97	91	98	141	70	98	133	53	83	89	98
106	64	79	113	57	73	63	100	107	63	80	112	54	65	59	100
185	88	126	191	84	112	84	99	160	74	106	164	67	101	92	100
136	88	107	133	73	99	87	97	106	59	77	119	55	80	77	97
185	102	133	171	86	119	81	99	167	79	113	156	67	89	80	99

Tabelle 18: Messwerte Patienten in Rückenlage

Bauchlage 1. Messung								Bauchlage 2. Messung							
Ober arm			Bein					Ober arm			Bein				
Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2	Syst	Diast	MAP	Syst	Diast	MAP	HF	SpO2
111	68	84	132	65	82	56	99	110	64	80	150	56	77	56	99
136	72	97	137	83	98	75	99	136	74	99	135	74	98	75	99
124	83	99	105	54	79	64	100	123	78	94	106	71	86	62	100
118	63	80	97	49	75	60	99	118	66	86	88	46	60	58	99
117	66	85	108	52	70	103	97	113	64	82	98	45	61	103	97
141	85	108	130	68	83	51	100	139	87	108	122	64	82	50	100
112	56	77	106	44	74	61	99	115	56	79	94	42	65	59	99
110	60	80	130	46	64	50	99	113	59	82	129	42	61	50	99
106	63	79	90	62	74	78	97	113	66	82	109	49	75	64	98
160	69	107	149	62	95	77	98	158	73	105	139	63	87	71	98
132	71	95	158	72	106	46	98	125	69	91	146	69	88	47	98
142	86	109	123	59	75	51	100	143	94	112	142	70	82	49	100
167	74	107	161	58	89	58	99	163	63	100	159	53	83	56	98
129	72	96	133	66	79	53	99	120	68	89	126	61	74	51	99
107	71	84	110	54	78	55	98	107	68	83	118	52	74	57	97
130	72	96	152	71	88	62	98	135	70	97	161	75	94	63	97
135	72	98	146	81	104	75	94	132	79	101	140	78	99	76	96
134	61	88	91	44	64	58	99	140	63	90	98	53	65	65	99
136	64	91	130	53	74	54	100	122	58	84	123	49	66	54	100
115	70	87	108	56	73	70	97	129	62	87	113	59	77	67	96
107	54	78	98	46	61	72	99	108	55	79	100	39	63	71	99
162	75	108	136	55	83	53	99	134	66	94	116	41	70	65	99
106	55	75	114	52	69	61	98	103	57	74	110	50	63	61	98
106	55	76	104	41	54	60	99	100	55	73	98	39	51	59	99
120	76	94	129	64	83	62	98	117	72	90	122	54	77	63	97
108	60	77	93	46	64	64	96	108	62	78	94	49	59	66	96
122	86	100	119	64	81	74	97	116	62	84	100	54	73	69	97
142	74	102	130	48	107	76	100	140	74	101	124	53	99	75	100
118	62	84	100	57	68	69	99	110	70	85	106	60	71	65	97
146	80	108	137	77	97	84	100	148	85	111	136	78	99	85	100
105	57	78	104	49	63	72	95	113	61	80	106	41	70	77	94
143	65	94	119	59	69	63	99	137	63	91	111	52	74	50	100

Tabelle 19: Messwerte Patienten in Bauchlage

## 7.2 Streudiagramme

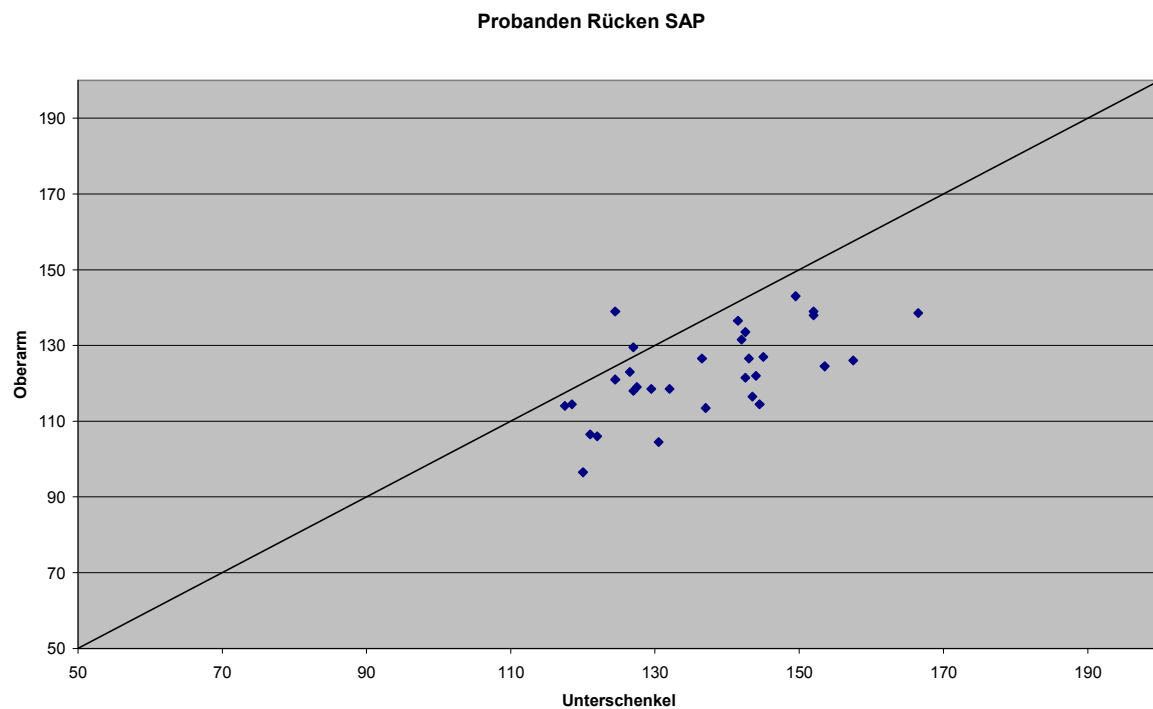


Abbildung 22: Streudiagramm, Probandengruppe, Rückenlage, systolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

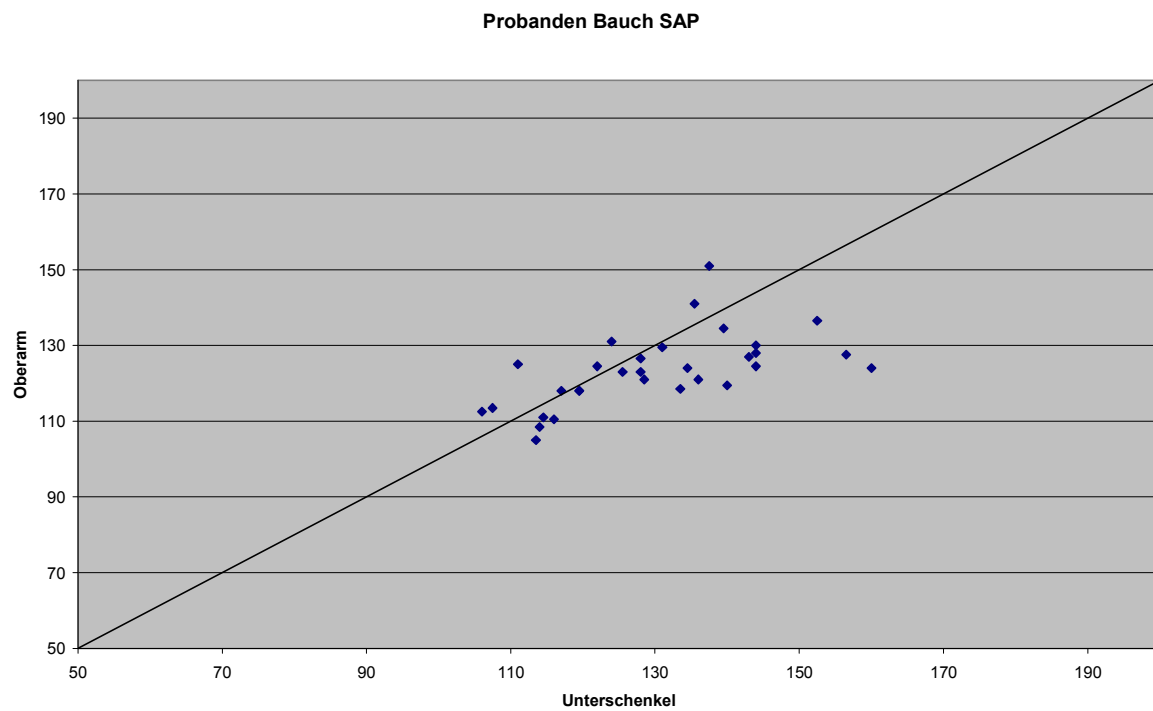


Abbildung 23: Streudiagramm, Probandengruppe, Bauchlage, systolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

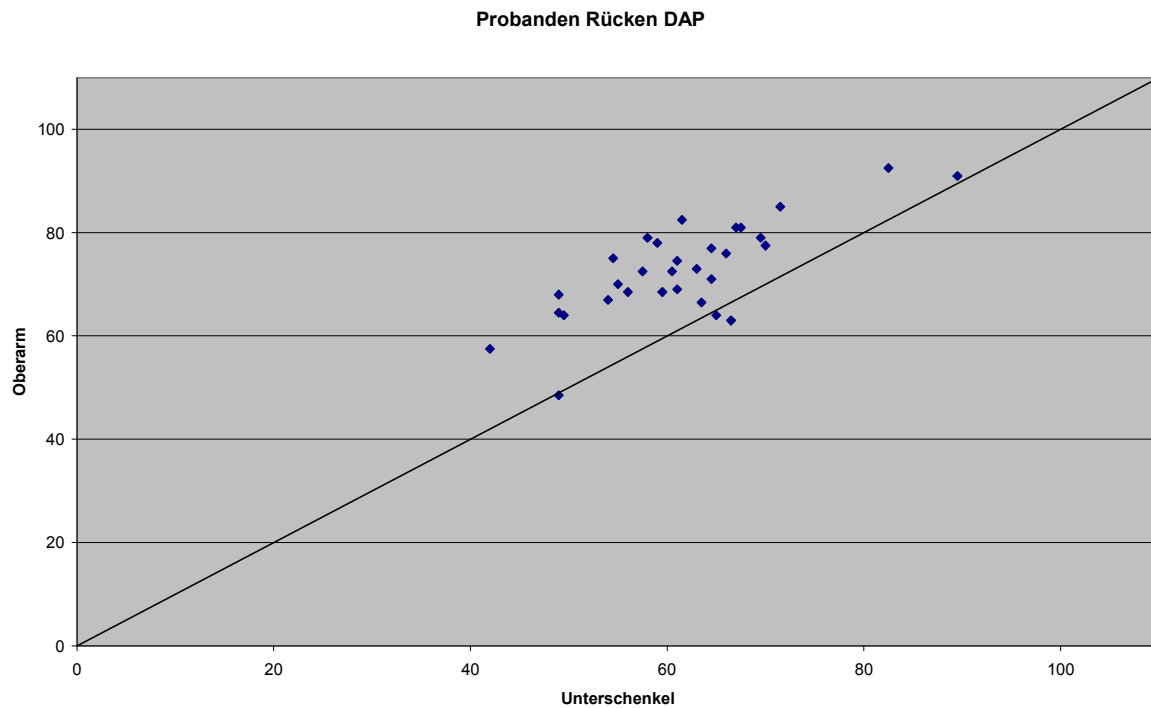


Abbildung 24: Streudiagramm, Probandengruppe, Rückenlage, diastolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

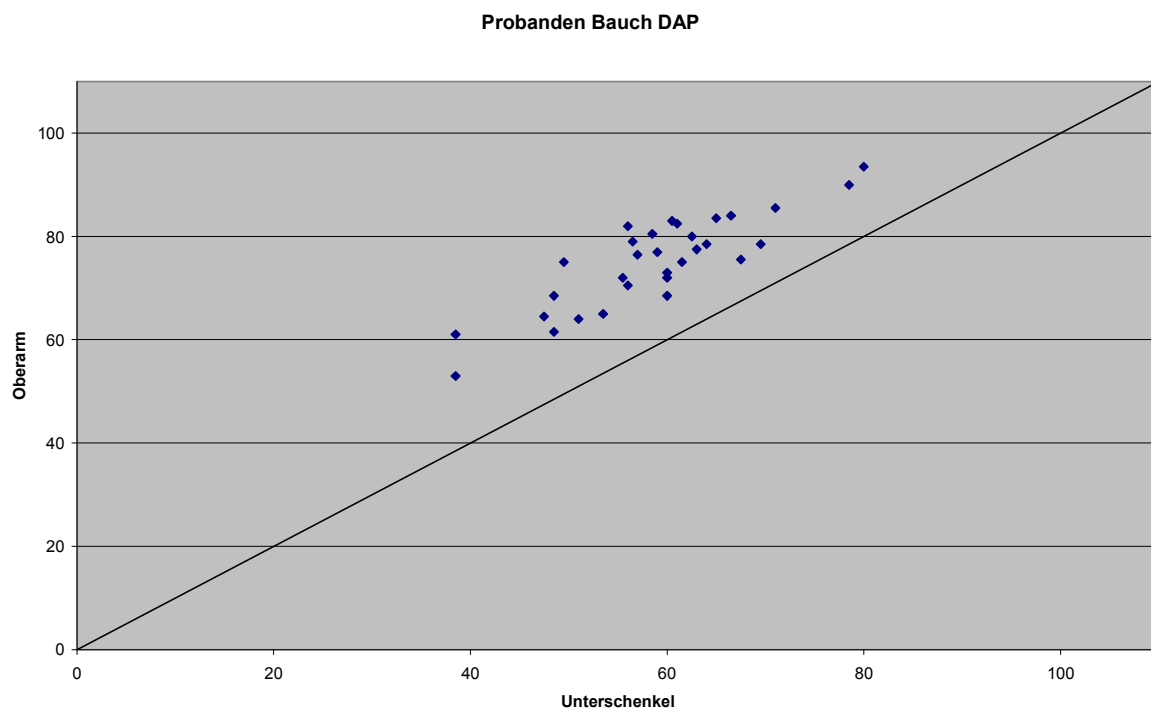


Abbildung 25: Streudiagramm, Probandengruppe, Bauchlage, diastolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

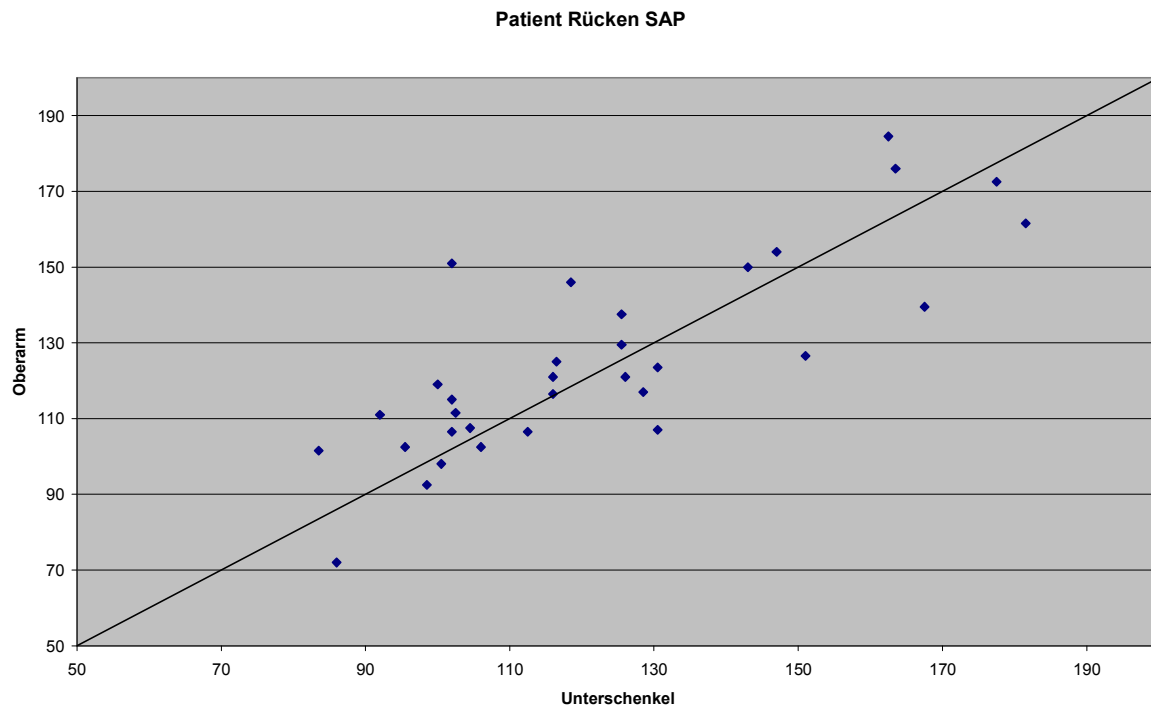


Abbildung 26: Streudiagramm, Patientengruppe, Rückenlage, systolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

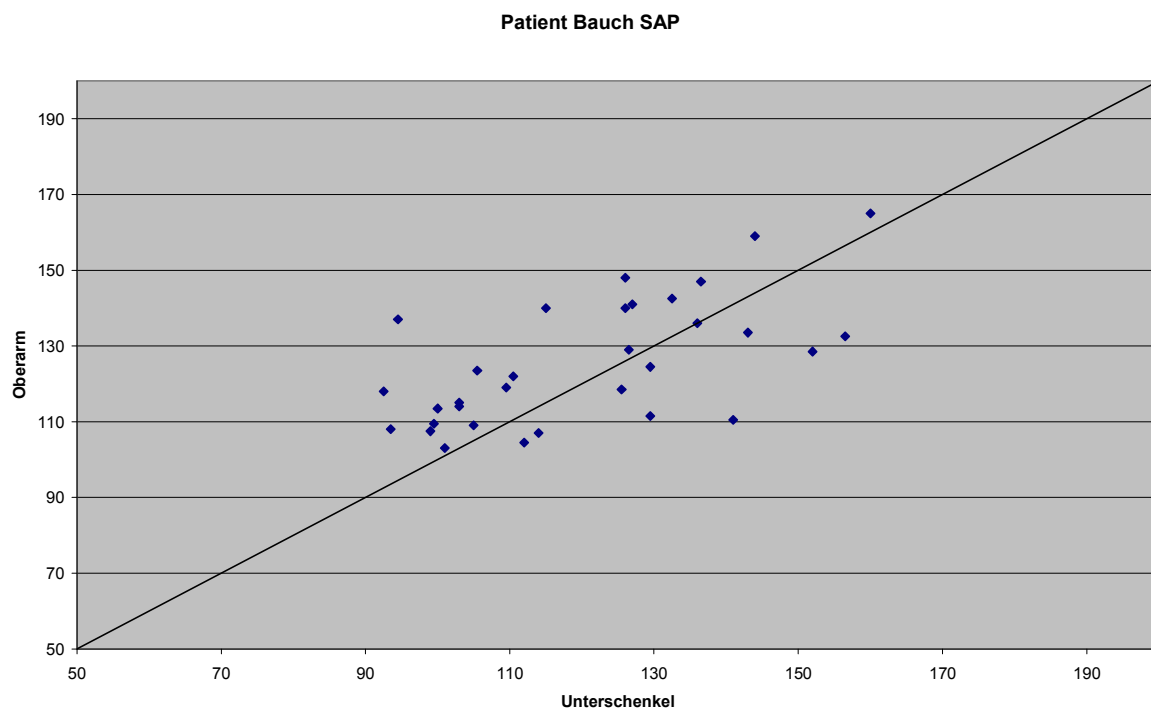


Abbildung 27: Streudiagramm, Patientengruppe, Bauchlage, systolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

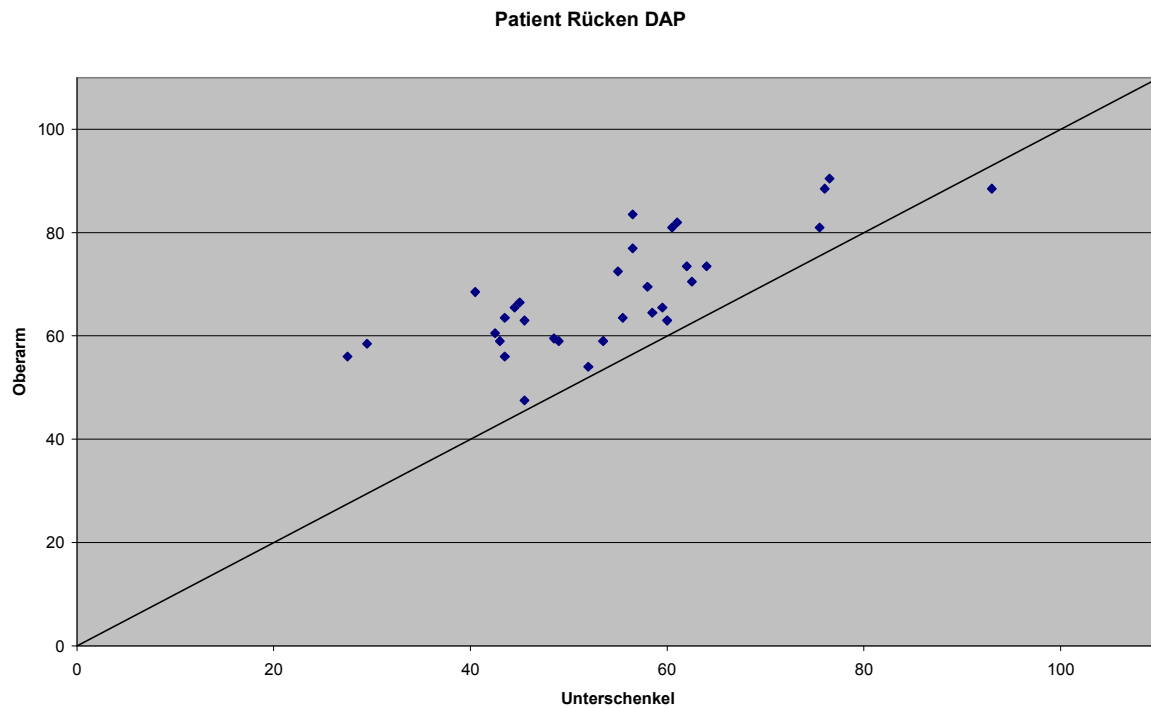


Abbildung 28: Streudiagramm, Patientengruppe, Rückenlage, diastolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])

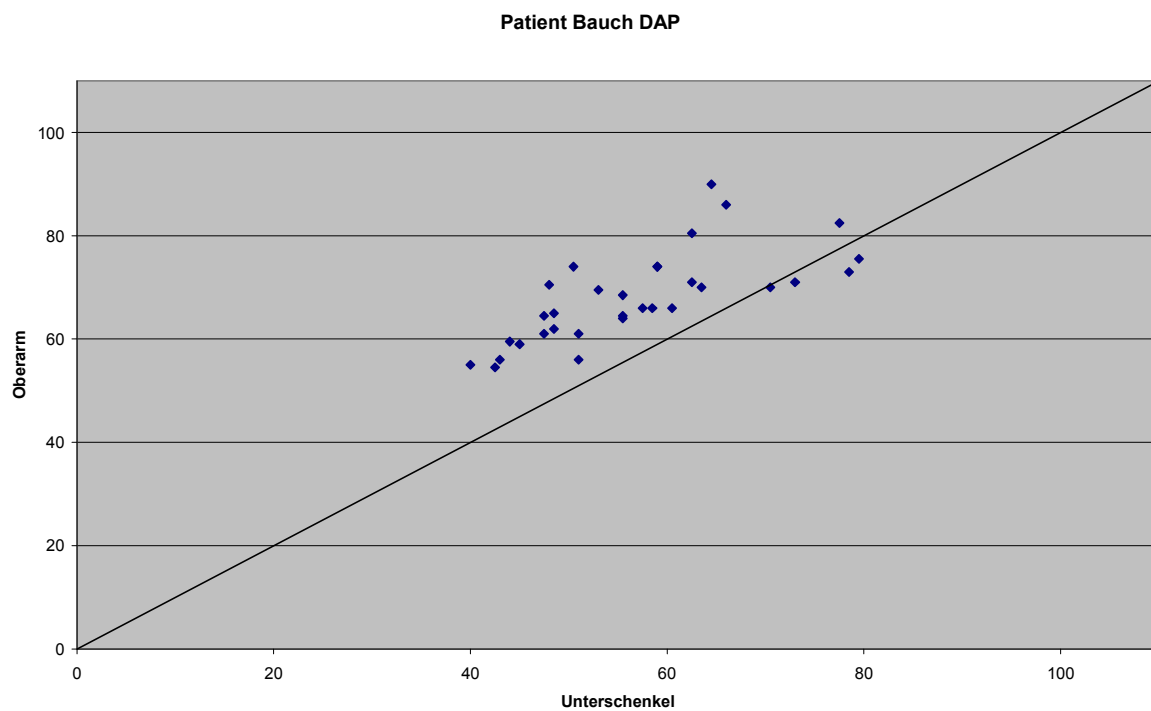


Abbildung 29: Streudiagramm, Patientengruppe, Bauchlage, diastolischer Blutdruck  
(Ordinate: Oberarmmesswert, Abszisse: Unterschenkelmesswert; [mmHg])



### 7.3 Bland-Altman-Plot

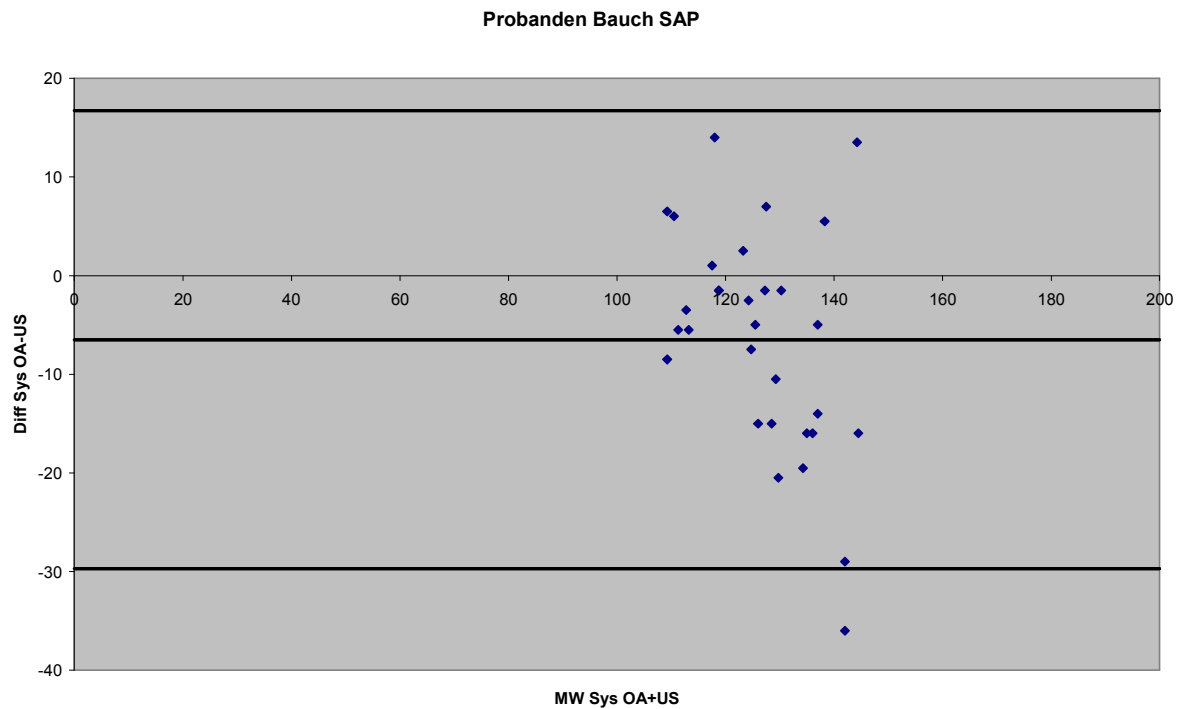


Abbildung 30: Bland-Altman-Plot, Probanden, Bauchlage, systolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

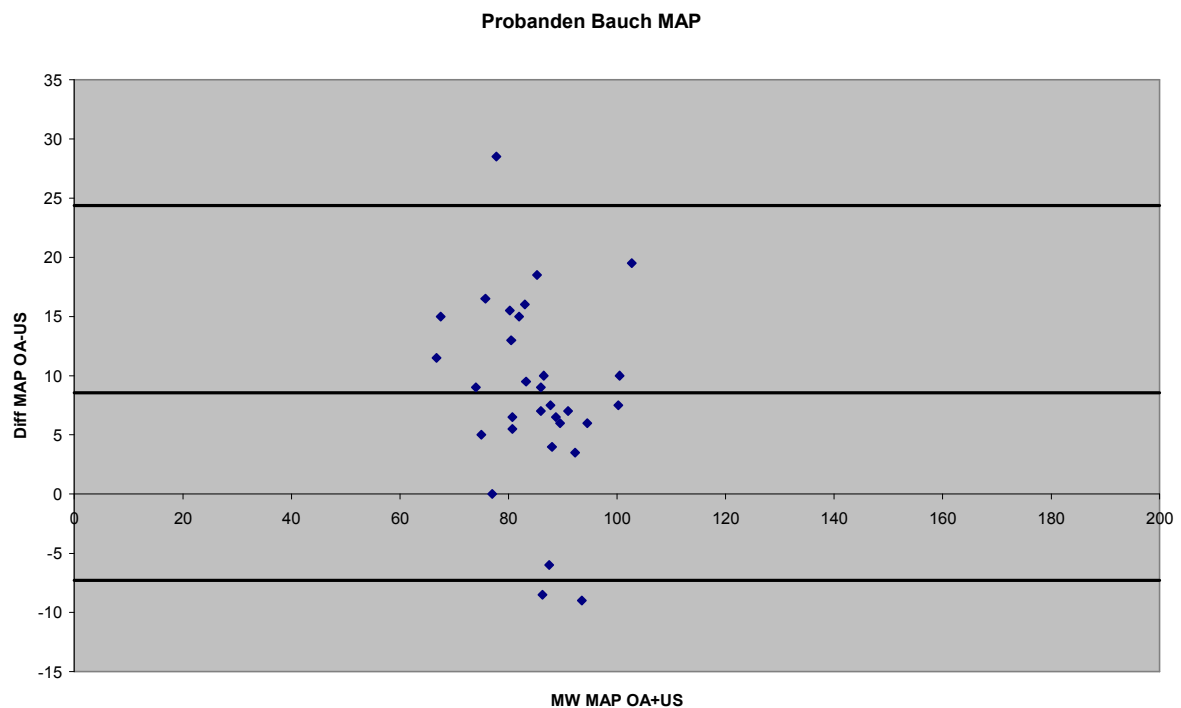


Abbildung 31: Bland-Altman-Plot, Probanden, Bauchlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

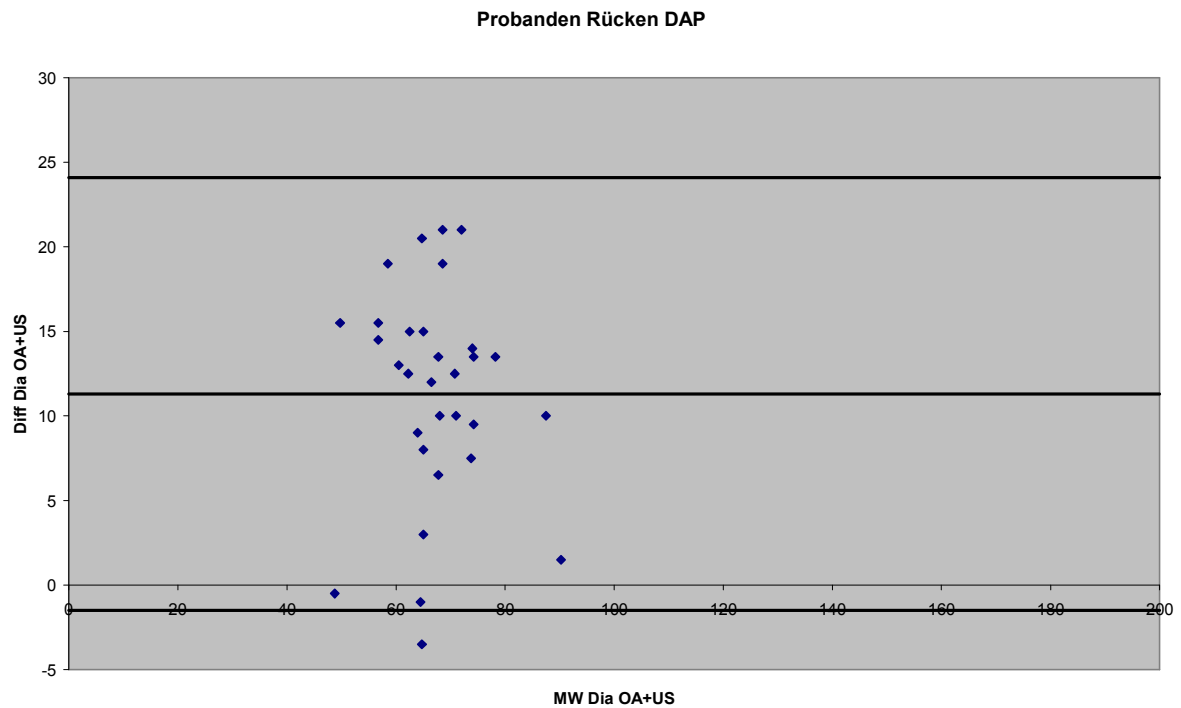


Abbildung 32: Bland-Altman-Plot, Probanden, Rückenlage, diastolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

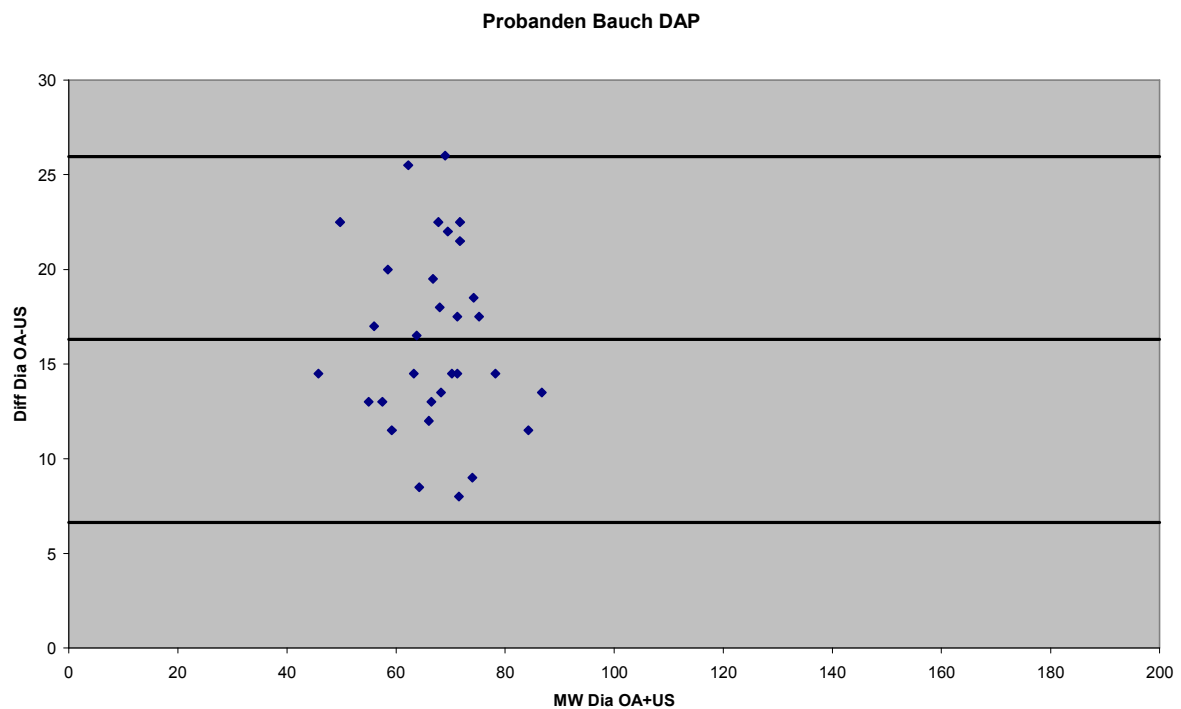


Abbildung 33: Bland-Altman-Plot, Probanden, Bauchlage, diastolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

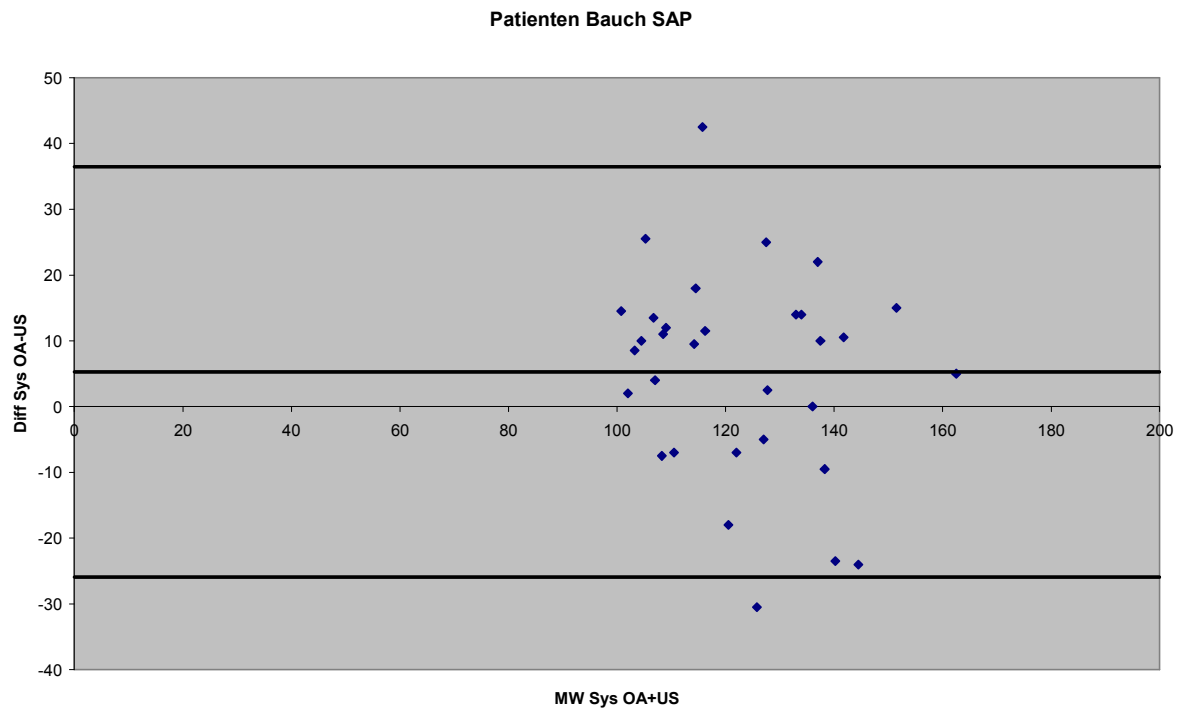


Abbildung 34: Bland-Altman-Plot, Patienten, Bauchlage, systolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

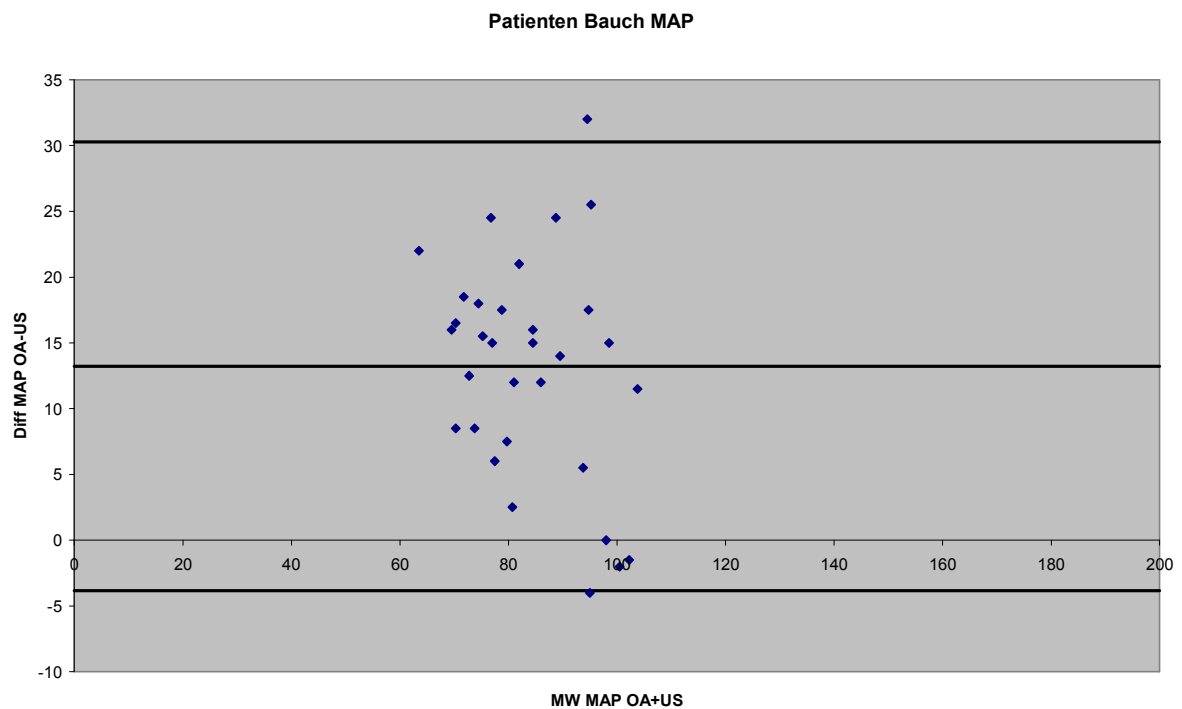


Abbildung 35: Bland-Altman-Plot, Patienten, Bauchlage, mittlerer arterieller Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

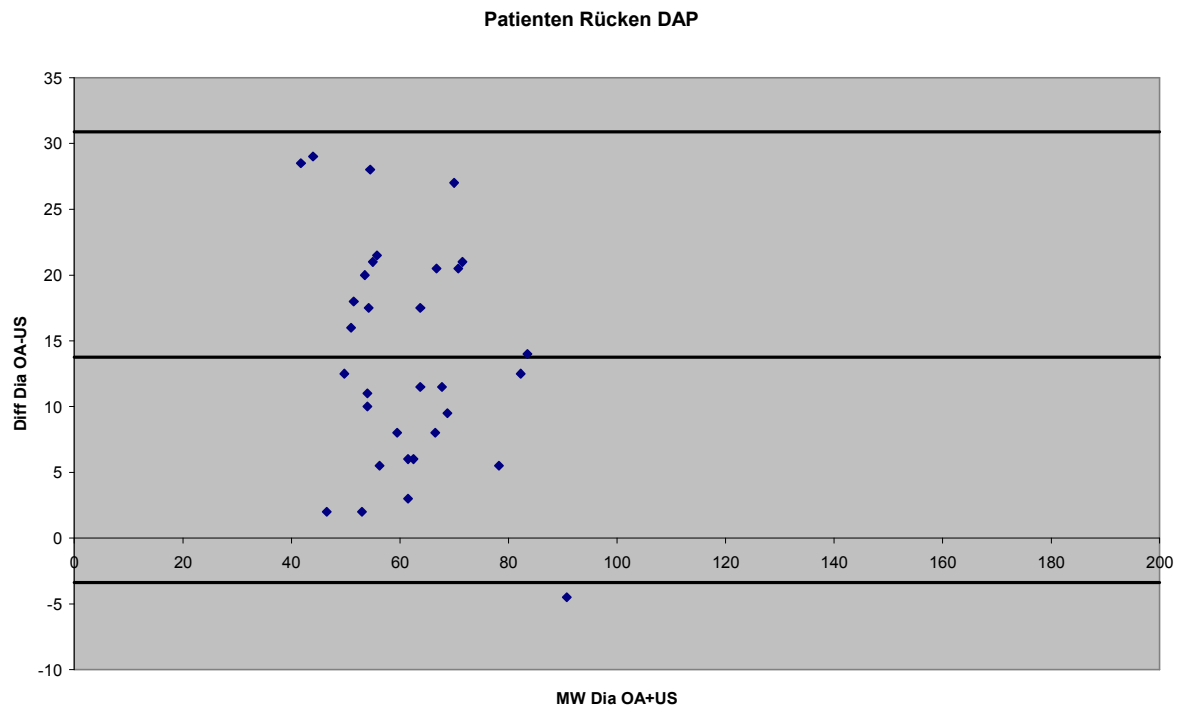


Abbildung 36: Bland-Altman-Plot, Patienten, Rückenlage, diastolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

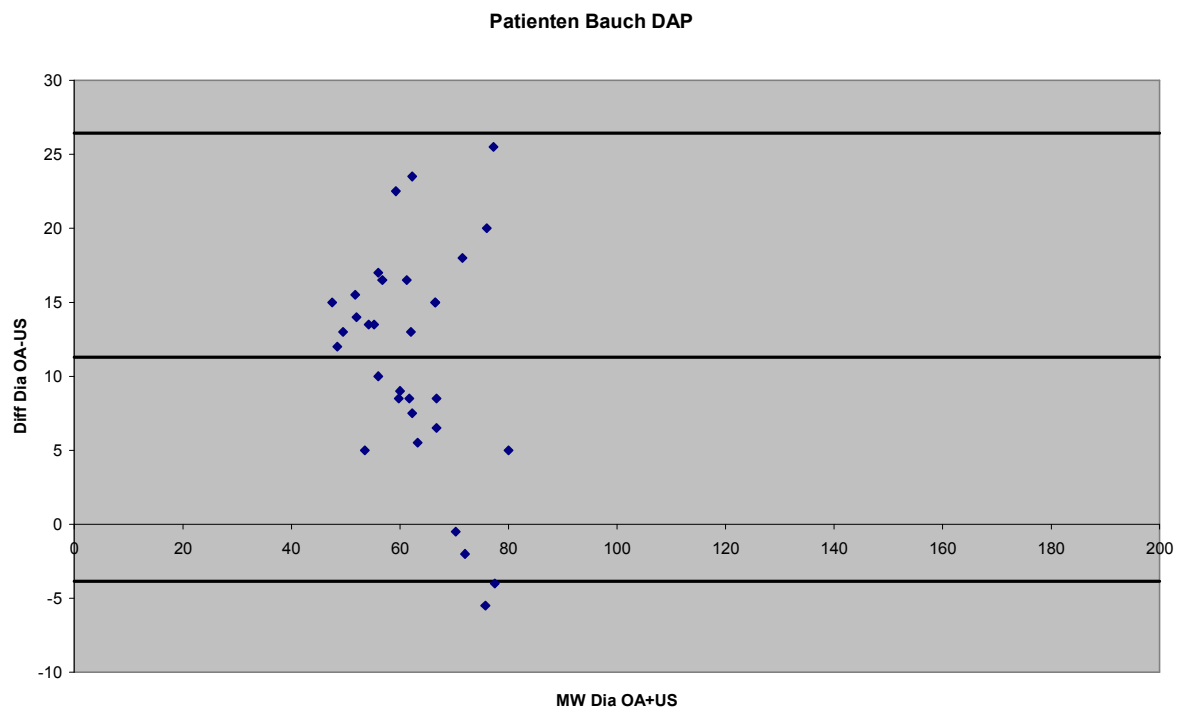


Abbildung 37: Bland-Altman-Plot, Patienten, Bauchlage, diastolischer Blutdruck (Ordinate: Differenz der Messwerte Oberarm – Unterschenkel, Abszisse: Mittelwert der Messwerte (Oberarm + Unterschenkel)/2 [mmHg])

## 7.4 Student Verteilung – Tabelle

$q$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.025$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.005$
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
$\infty$	1.282	1.645	1.960	2.327	2.576

Tabelle 20: Student-Verteilung mit  $\alpha$  = Signifikanzniveau und  $q$  = Freiheitsgrad einer  $t_{(q)}$ -verteilten Zufallsvariablen