

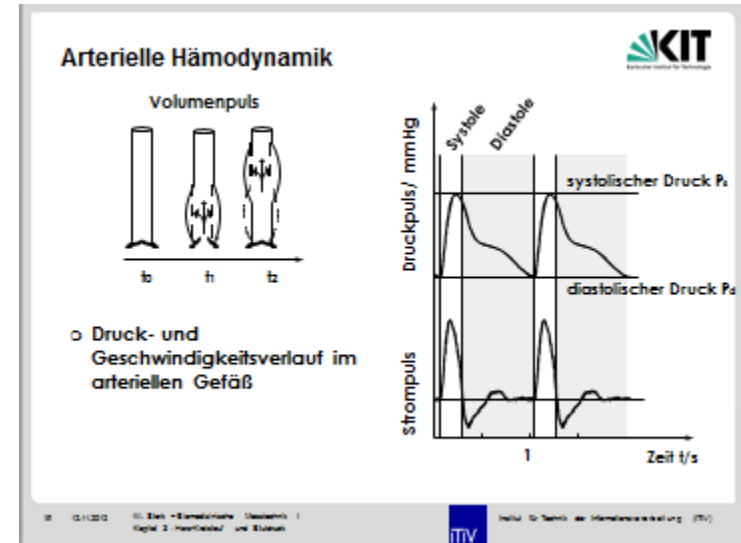
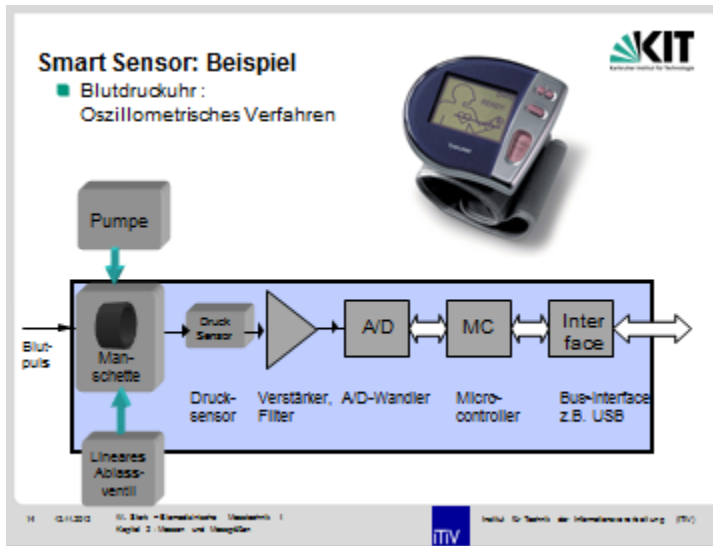
Biomedizinische Messtechnik I

Prof. Wilhelm Stork

Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)



Wiederholung



Blutdruckkurven (Herz nah, Herz fern)

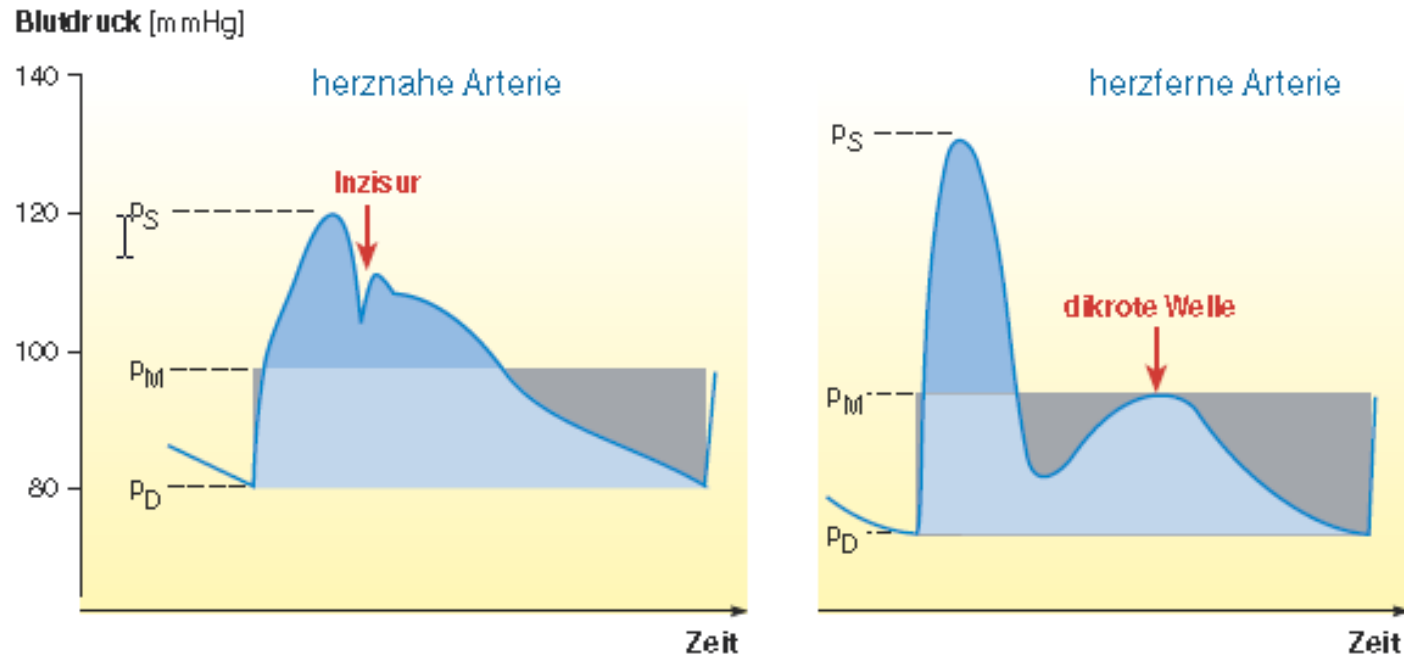


Abb.8-32 Blutdruckverlauf in einer herznahe (Aorta) und herzfernen Arterie. In der Peripherie ist die Blutdruckamplitude besonders durch Anstieg des systolischen Drucks erhöht. Der mittlere Blutdruck ist jedoch herzfern vermindert, wie aus der Umwandlung der Fläche unter einer Pulscurve in ein Rechteck gleicher Fläche (bestehend aus grauen und hellblauen Flächen) nachgewiesen werden kann. p_S = systolischer Druck, p_M = mittlerer Druck, p_D = diastolischer Druck.

Modell des homogenen Gefäßsegments

■ Allgemeine Navier-Stokesche Bewegungsgleichungen für eine

- laminar strömende
- inkompressible
- Newtonsche Flüssigkeit

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = -\text{grad } p + \vec{f}_A + \eta \Delta \vec{v}$$

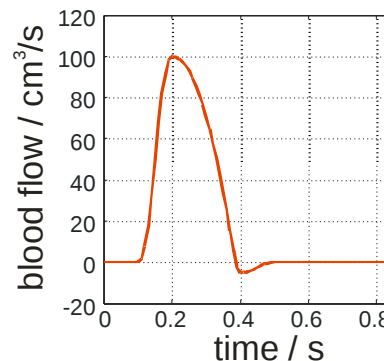
- Navier-Stokes komplex
=> Vereinfachung

- Ansatz (Taylorentwickl.)
grad nur in z

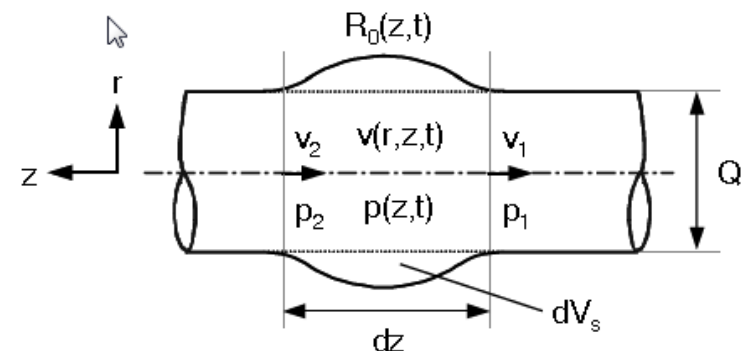
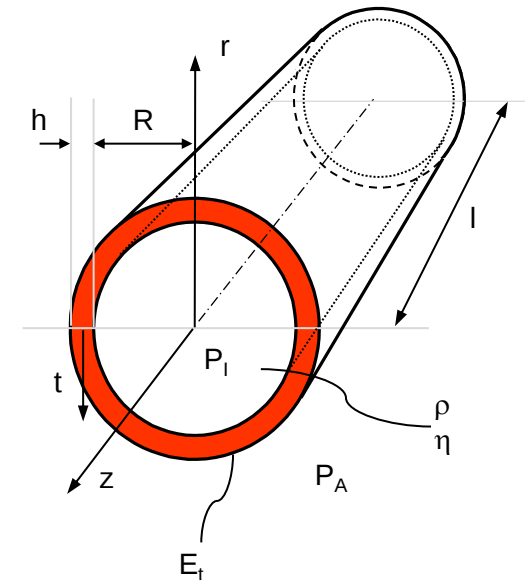
$$p_1 = p(z, t)$$

$$p_2 = p(z + dz, t) = p(z, t) + \frac{dp}{dz} \cdot dz$$

Initialer Herzfluss



Arteriensegment



Schlauchleitung

■ Druckdifferenz

$$p_2 - p_1 = \frac{dp}{dz} \cdot dz$$

■ Kräftegleichgewicht (Q: Querschnitt)

■ Bernoulli

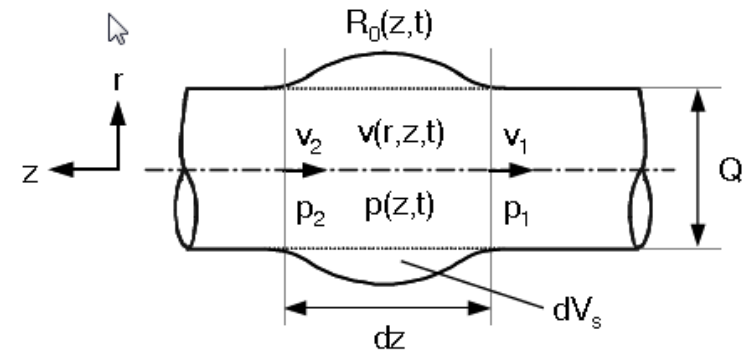
$$\rho \cdot Q \cdot dz \cdot \frac{dv}{dt} = -Q \cdot \frac{dp}{dz} \cdot dz$$

■ Druckgradient erzwingt Beschleunigung der Flüssigkeit

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} = -\frac{dp}{dz}$$

■ Kontinuitätsgleichung

$$Q \cdot (v_1 - v_2) = \frac{dV_s}{dt}$$



Schlauchleitung II

- Analog zu p_2 Taylorentwicklung für v_2

$$-Q \cdot \frac{dv}{dz} = \left(\frac{dV_s}{dp} \cdot \frac{1}{dz} \right) \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{C}{dz} \cdot \frac{dp}{dt} = C' \cdot \frac{dp}{dt}$$

Mit Compliance (Elastizität) $C = \frac{dV}{dp}$ und c Ausbreitungsgeschwindigkeit der Pulswelle

$$\kappa = \frac{dp}{dV} \cdot V = \frac{V}{C} \quad c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \quad C = \frac{V_s}{\rho \cdot c^2}$$

Folgt die Differentialgleichung

Zeitl. Differenzierung:
Wellengleichung für p und v

$$-\rho \cdot \frac{dv}{dz} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{dp}{dt}$$

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = c^2 \cdot \frac{d^2 p}{dz^2} \quad \frac{d^2 v}{dt^2} = c^2 \cdot \frac{d^2 v}{dz^2}$$

Dissertation Peter Elter, Uni Ka, 2001,
<http://d-nb.info/1013872142/34>

Harmonischer Lösungsansatz

- Harmonischer Lösungsansatz

$$p(z, t) = P \cdot e^{j\omega \cdot t - \gamma \cdot z}$$

$$v_z(r, z, t) = V_z(r) \cdot e^{j\omega \cdot t - \gamma \cdot z}$$

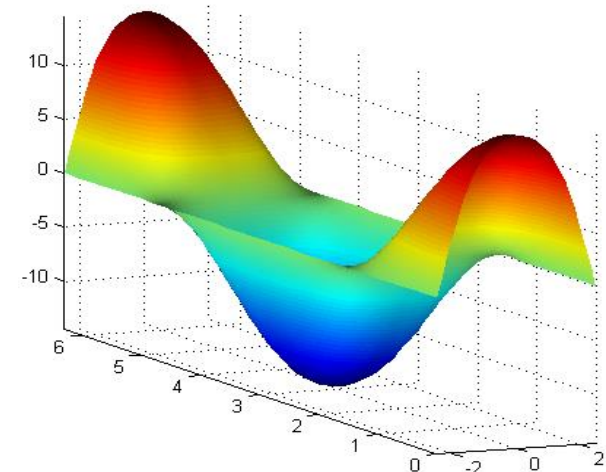
- führt zur Besselschen Differentialgleichung mit J_0 Besselfunktion 0-ter Ordnung

$$v_z(r, z, t) = \frac{\gamma}{j\omega\rho} \cdot \left(1 - \frac{J_0\left(\sqrt{\omega\rho/\eta} \cdot j^{3/2} \cdot r\right)}{J_0\left(\sqrt{\omega\rho/\eta} \cdot j^{3/2} \cdot R_0\right)} \right) \cdot P \cdot e^{j\omega \cdot t - \gamma \cdot z}$$

Modell des homogenen Gefäßsegments

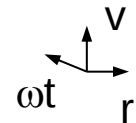
- Lösung ergibt Geschwindigkeitsprofil

$$v_z(r, z, t) = \frac{\gamma}{j\omega\rho} \left(1 - \frac{J_0\left(j^{3/2}r\sqrt{\omega\rho/\eta}\right)}{J_0\left(j^{3/2}R_0\sqrt{\omega\rho/\eta}\right)} \right) \cdot P \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$$



- Integration über Querschnitt liefert Fluss

$$i(z, t) = -\frac{\gamma \cdot \pi R_0^2}{j\omega\rho} \frac{J_2\left(j^{3/2}R_0\sqrt{\omega\rho/\eta}\right)}{J_0\left(j^{3/2}R_0\sqrt{\omega\rho/\eta}\right)} \cdot P \cdot e^{j\omega t - \gamma z} = \frac{1}{Z_L} \cdot P \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$$



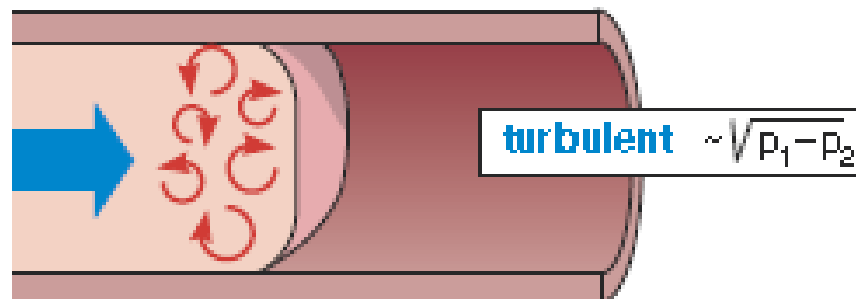
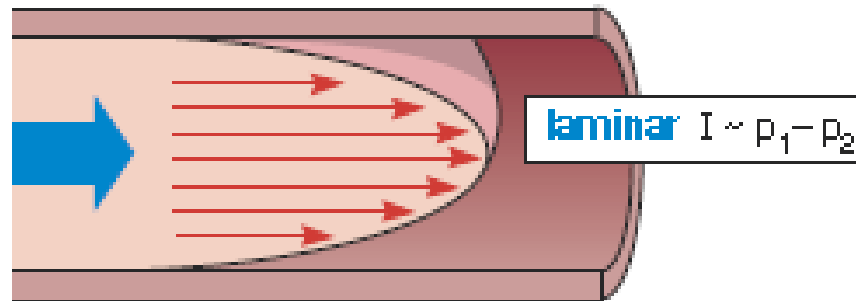
- Koeffizientenvergleich

$$Z_L = - \frac{j r \times c}{p R_0^2} \sqrt{\frac{J_0\left(j^{3/2}R_0\sqrt{wr/h}\right)}{J_2\left(j^{3/2}R_0\sqrt{wr/h}\right)}}$$

$$g = Z_L \frac{p R_0^2 \times w}{j r \times c^2}$$

Strömungsprofile

- Laminar: Parabolisches Profil
 - Volumenfluss proportional zu Druckdifferenz

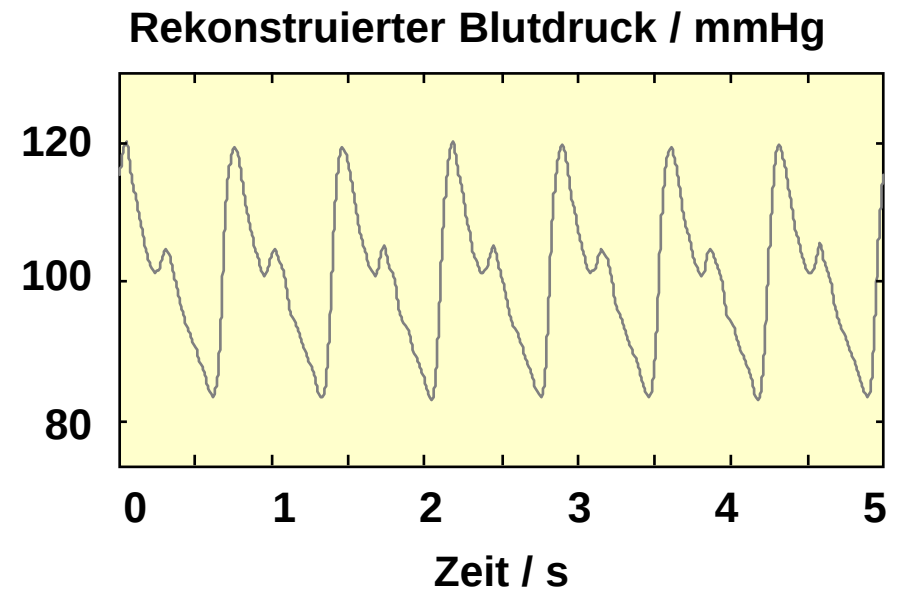


- Turbulente Strömung (Hindernisse)
 - Volumenfluss proportional zu Wurzel Druckdifferenz

Simulation

■ Rekonstruktion des Blutdrucks aus anderen kardiovaskulären Parametern

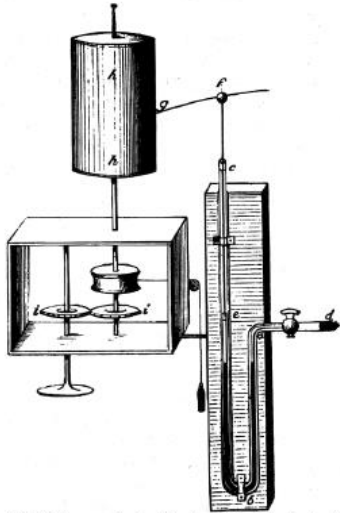
- Blutflußgeschwindigkeit
- Pulswellengeschwindigkeit
- Blutdichte
- Blutviskosität
- Arterienradius
- Arteriensegmentlänge
- Dämpfung



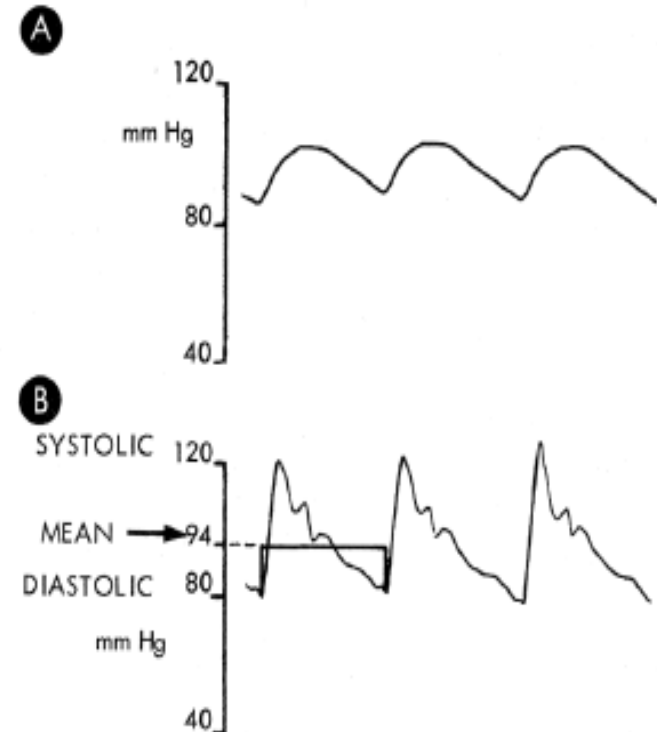
■ Pulsform durch vor- und rücklaufende Wellen

Druckkurven: Invasives Manometer

■ Quecksilber Manometer



Carl Ludwig's (1847) Kymograph (Ludwig C.: Müller's Arch. Anat., pp. 240-302, 1877)
(Geddes, 1970)



■ Moderner Katheter

Zur Arterie

Messöffnung

Katheter

3-Wege-
Absperrhahn

Spülen oder Blutentnahme

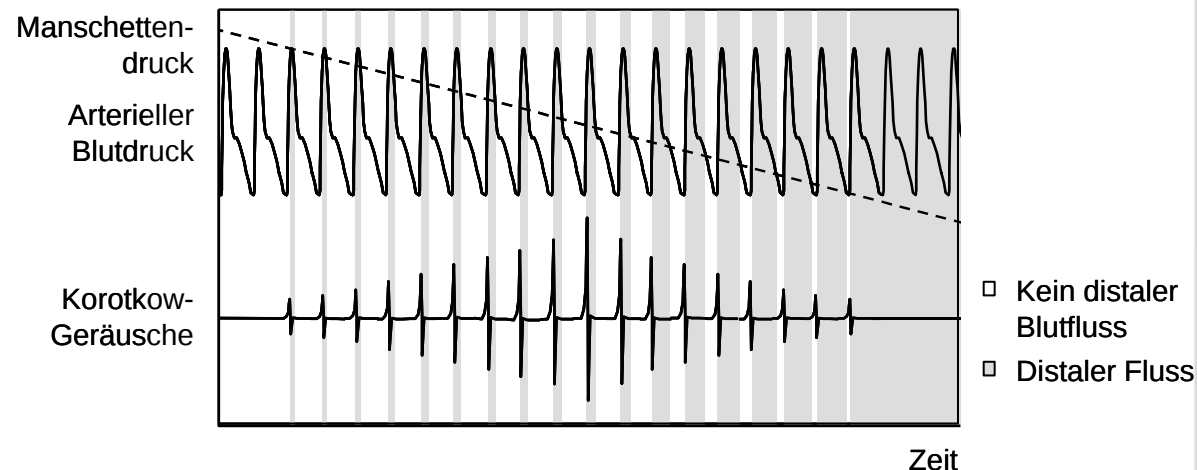
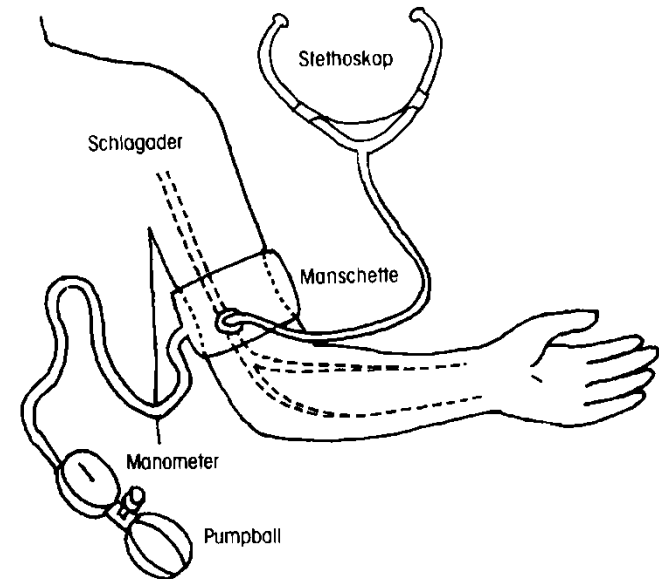
Kalibrierung und Blasenentfernung

Drucksensor

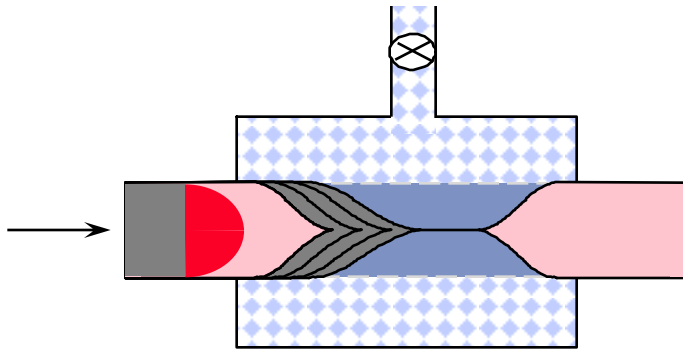
•Goldstandard der Blutdruckmessung

Auskultation: Nichtinvasiv

- Unterbrechung des Arteriellen Blutstroms im Unterarm durch Aufpumpen einer Druckmanschette
- Langsame Druckverminderung und gleichzeitiges Abhören der Korotkow'schen Strömungsgeräusche in der Ellenbeuge
- Einsetzen der Pulsgeräusche
 - ▶ Systolischer Blutdruck
- Verschwinden der Pulsgeräusche
 - ▶ Diastolischer Blutdruck

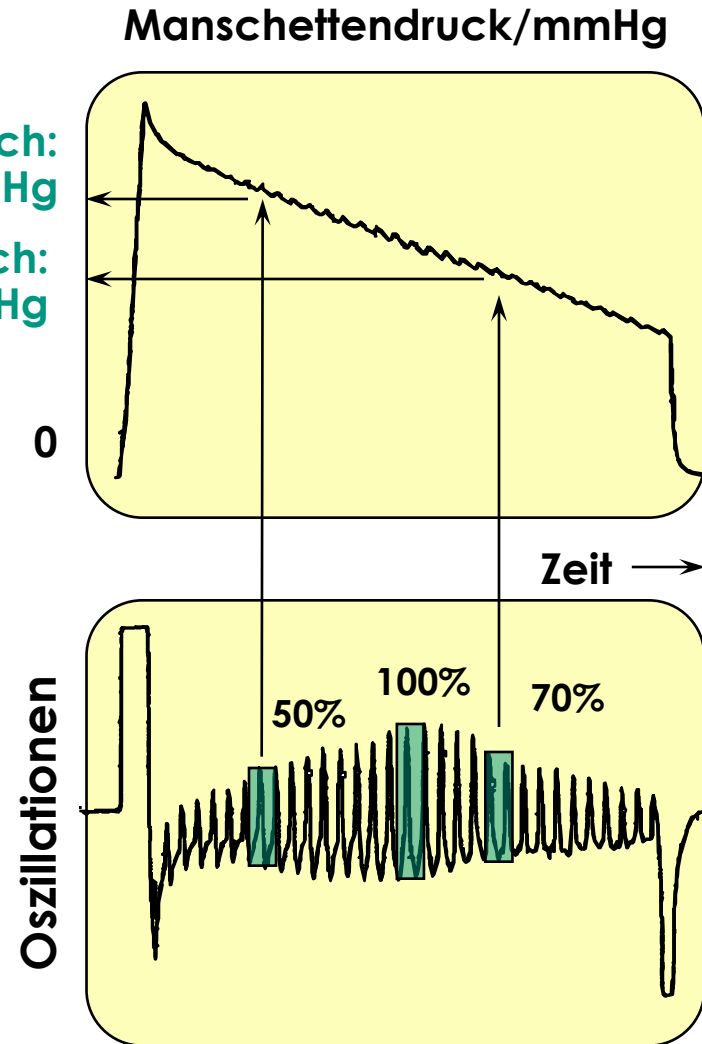


Oszillometrische Manschettenmethode



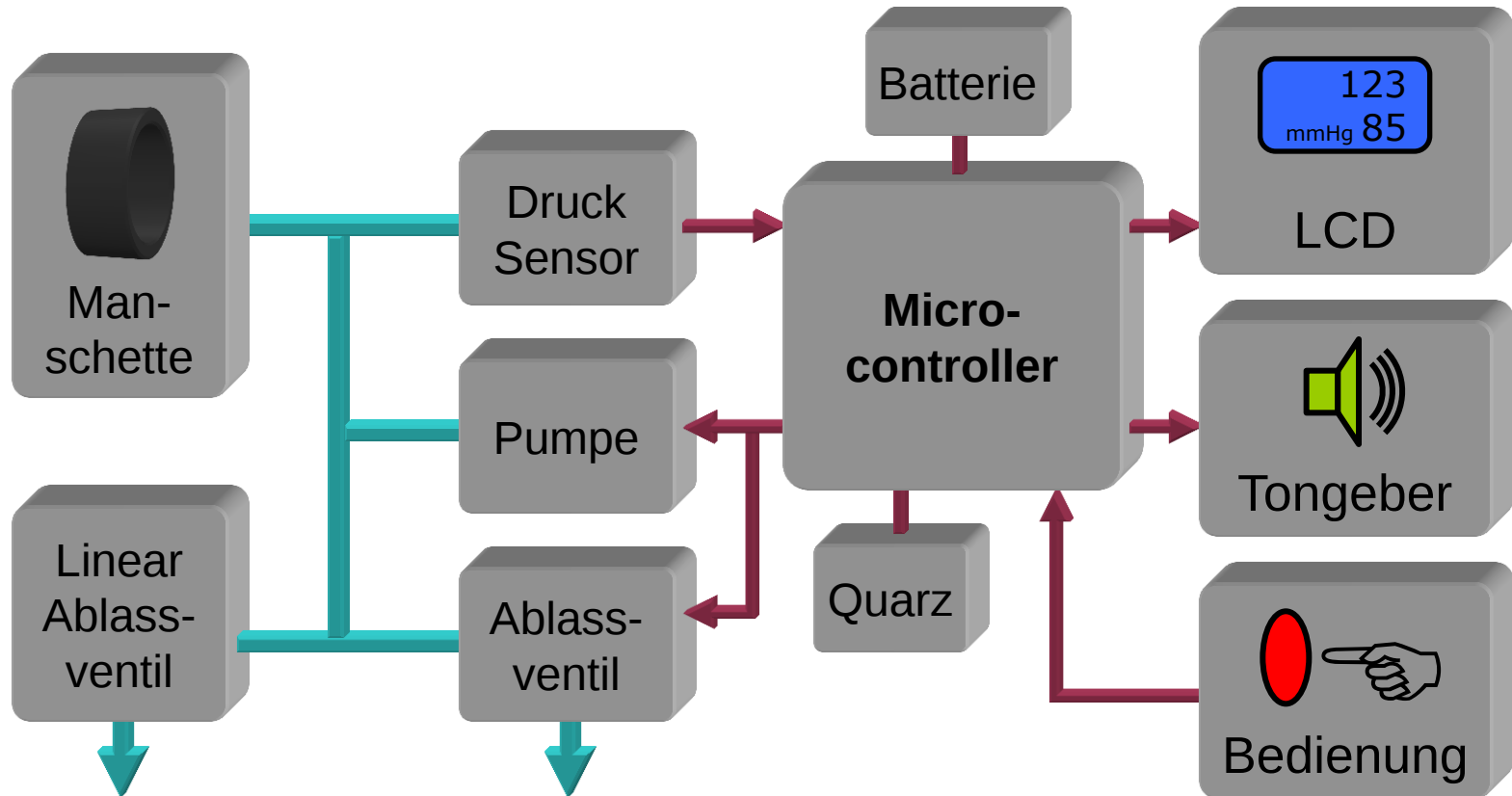
Systolisch:
125 mmHg
Diastolisch:
85 mmHg

- Nichtinvasiv mit Manschette
- Automatische Systeme mit Signalverarbeitung
- Keine kontinuierliche Messung möglich
- Korrelation mit wahrem Blutdruck: ca. 85%
- 80% Marktanteil



Oszillometrisches Verfahren

■ Funktionsblöcke oszillometrischer Blutdrucksensor



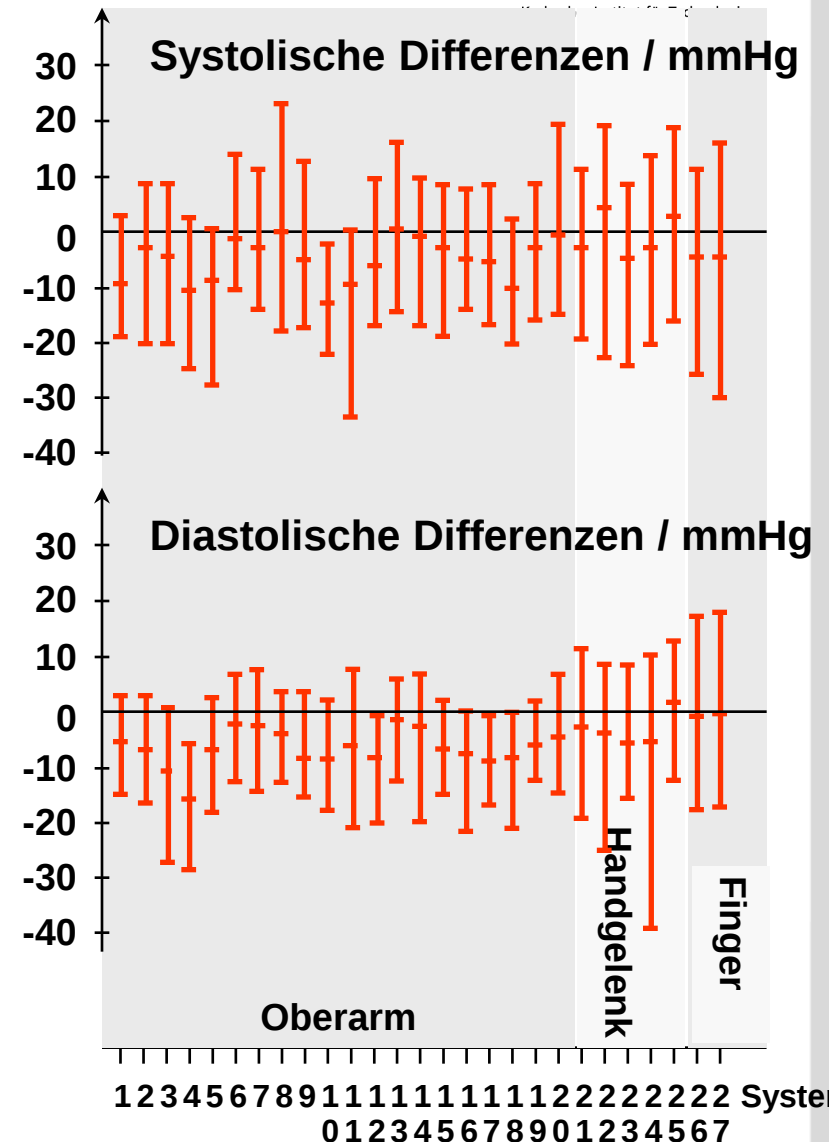
Meßgenauigkeit

- Messgenauigkeit des Blutdrucks mit oszillometrischen Systems gegen invasive Systeme:

- $r_{\text{sys}} = 0.59 - 0.88$

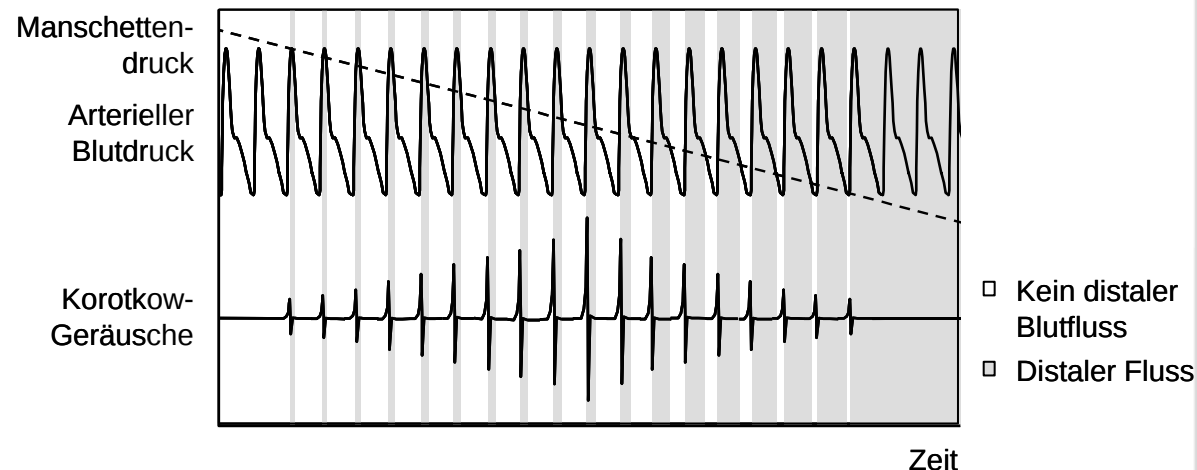
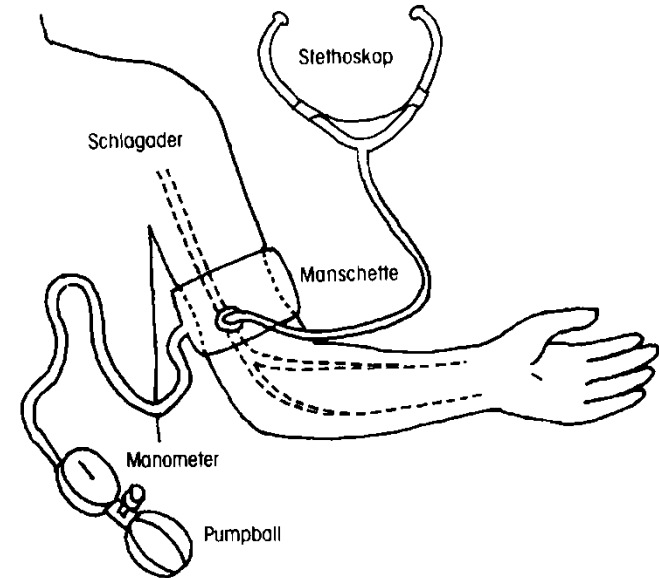
- $r_{\text{mean}} = 0.64 - 0.76$

- $r_{\text{dia}} = 0.46 - 0.72$

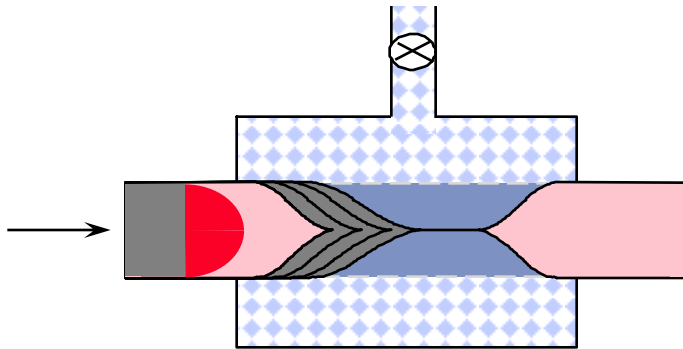


Auskultation: Nichtinvasiv

- Unterbrechung des Arteriellen Blutstroms im Unterarm durch Aufpumpen einer Druckmanschette
- Langsame Druckverminderung und gleichzeitiges Abhören der Korotkow'schen Strömungsgeräusche in der Ellenbeuge
- Einsetzen der Pulsgeräusche
 - ▶ Systolischer Blutdruck
- Verschwinden der Pulsgeräusche
 - ▶ Diastolischer Blutdruck

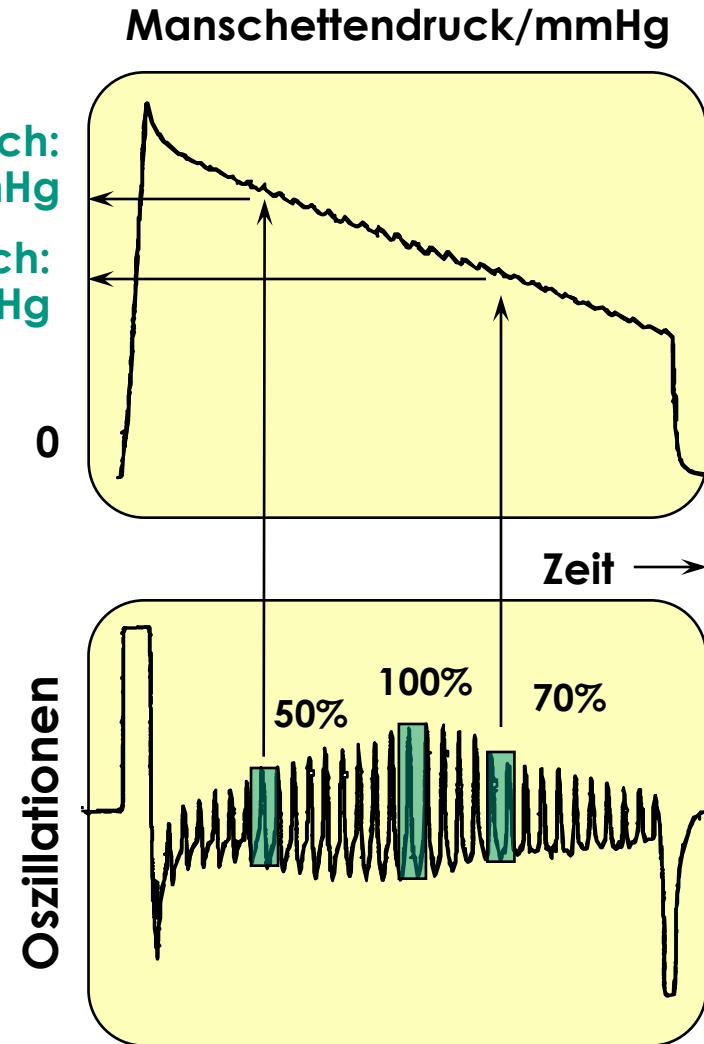


Oszillometrische Manschettenmethode



Systolisch:
125 mmHg
Diastolisch:
85 mmHg

- Nichtinvasiv mit Manschette
- Automatische Systeme mit Signalverarbeitung
- Keine kontinuierliche Messung möglich
- Korrelation mit wahrem Blutdruck: ca. 85%
- 80% Marktanteil



Normalwerte Blutdruck

I

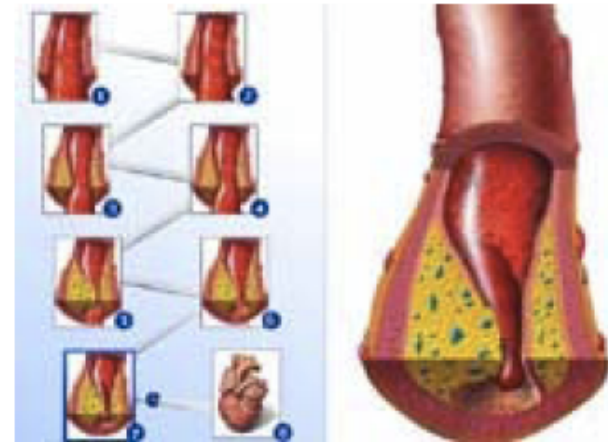
- **Neugeborene** 60 bis 80 mmHg systolisch
- **Säugling** 80 bis 85 mmHg systolisch
- **bis 10 Jahre** 85 bis 100 mmHg systolisch
- **10 bis 30 Jahre** ~ 120/80 mmHg
- **30 bis 40 Jahre** ~ 125/85 mmHg
- **40 bis 60 Jahre** ~ 135/90 mmHg
- **über 60 Jahre** ~ 150/95 mmHg

Zu niedriger Blutdruck

- **Menschen, die besonders häufig an niedrigem Blutdruck leiden sind:**
 - Jugendliche zwischen 12 und 17 Jahren(verursacht durch die Pubertät)
 - schlanke Frauen
 - Menschen nach starkem Gewichtsverlust
 - Schwangere und Stillende
 - sehr schlanke Senioren
 - Menschen, die zu wenig trinken
 - Menschen mit ausgeprägten Krampfadern
 - Auch Schlaf-, Beruhigungs- und Entwässerungsmittel sowie Antidepressiva können den Blutdruck so stark senken, dass eine so genannte sekundäre Hypotonie(Folge-Hypotonie) entsteht.
- **Beschwerden, die auf einen zu niedrigen Blutdruck hinweisen sind:**
 - Sehstörungen(silberne Sternchen, Schwarzwerden)
 - pulsierende Kopfschmerzen
 - Ohrensausen und Schwindel
 - Bewusstseinsstörungen bis hin zum Kollaps(Ohnmacht)
 - Herzrasen
 - frieren und kalter Schweiß
 - ständig kalte Hände und Füße

Zu hoher Blutdruck

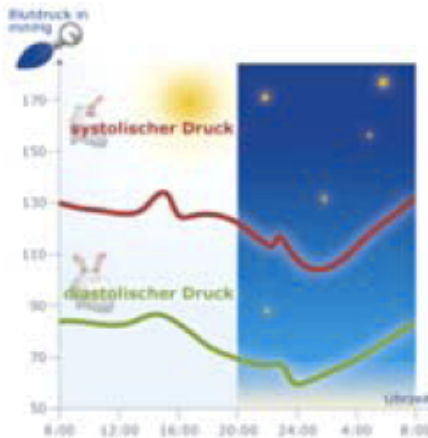
- **Wie macht sich Bluthochdruck bemerkbar?**
 - Die Hypertonie verläuft lange Zeit beschwerdefrei und macht sich häufig erst durch die Folgeerscheinungen bemerkbar. Regelmäßige Kontrolluntersuchungen sind daher sehr wichtig.
- **Mögliche Beschwerden bei sehr hohem Blutdruck:**
 - Kopfschmerzen
 - Herzklopfen, Atemnot
 - Schweißausbrüche
 - Sehstörungen
 - Schwindelgefühl
 - Übelkeit, Erbrechen
 - Krämpfe, Lähmungen
 - Bewusstseinsstrübung, Verwirrtheit
 - Nasenbluten
 - Aufhusten von blutigem Schleim
- Das plötzliche Ansteigen des Blutdrucks wird als **hypertensive Krise** (Hochdruckkrise) bezeichnet. Die genannten Beschwerden treten dabei akut und sehr stark auf. Es kann sogar zur Bewusstlosigkeit kommen. Ein derartiger Notfall erfordert eine umgehende ärztliche Versorgung.
- **Entscheidend ist der Schutz vor Schäden, die ein dauerhaft erhöhter Blutdruck verursacht. Eine unbehandelte Hypertonie führt zu einer deutlichen Reduktion der Lebenserwartung.**



Blutdruckmessung zu Hause

- **Der Blutdruck ist Schwankungen unterlegen in Abhängigkeit von**

- Tageszeit
- körperlicher Aktivität
- nervlicher Anspannung
- Nahrungsaufnahme
- Körperstellungen (Sitzen, Liegen, Stehen)
- Schmerzzustände
- Klimatische Bedingungen (Hitze, Kälte, Nässe)
- Physikalische Umgebungseinflüsse (Lärm, Vibration, elektrischer Strom, Höhenbedingungen/Sauerstoffmangel, erhöhter Luftdruck (Tauchen/Pressatmung), Ozonbelastung)
- Chemisch-toxische Faktoren (Cadmium, Arsen, Blei, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, organische Lösungsmittel, Schwefelwasserstoff, Methanol, Salpetersäureester, ...)
- Genussmittel (Rauchen, Alkohol, Kaffee, ...)
- Füllung der Harnblase



- **Daher:**

- 3 - 5 Folgemessungen innerhalb 10 Minuten
- 4 - 5 mal am Tag oder über 24 h messen
- Langzeitblutdruck: Tagphase alle 15 Minuten / Nachtphase 30 Minuten
- Messungen jeden Tag zur ungefähr gleichen Zeit unter vergleichbaren Bedingungen (ausgeruht und entspannt)
- immer an der gleichen Stelle (Oberarm) messen
- Manschette mit dem Armumfang abstimmen
- normal Atmen und nicht reden

Auslegung eines Oszillometrischen Drucksensors

- Wie messe ich den Druck in der Manschette?
- Wie groß ist die Druckänderung in der Manschette durch den Pulsatilen Arteriendruck?
- Wie gehe ich bei der Entwicklung vor?



Radiusänderung bei Druckvariation

Arterien

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \approx 1 \text{ mmHg/ml}$$

Venen

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \approx 0.005 \text{ mmHg/ml}$$

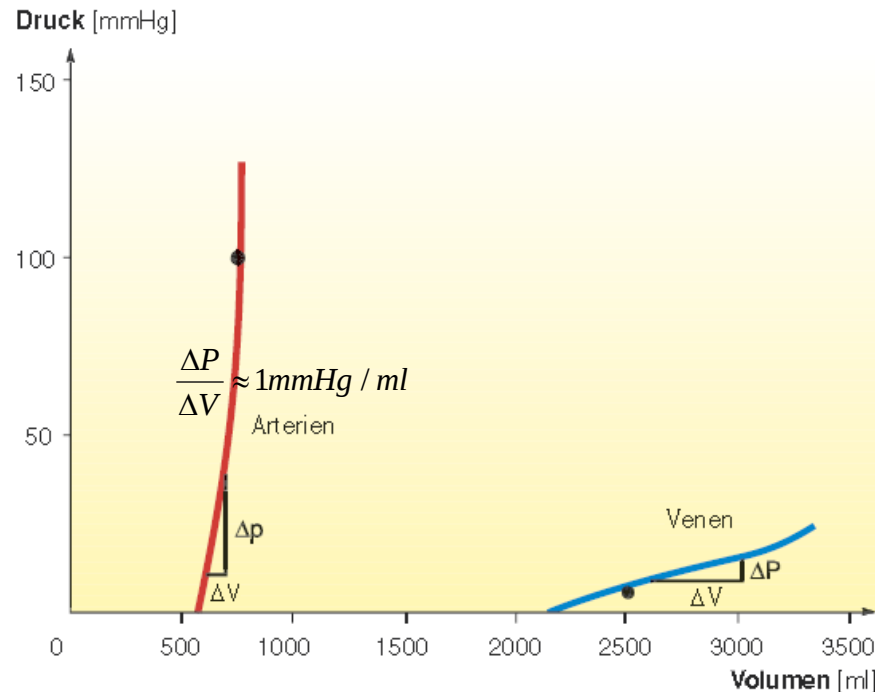


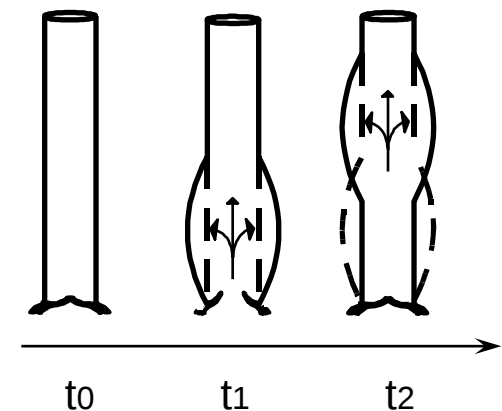
Abb.8-31 Druck-Volumen-Beziehung des arteriellen und venösen Systems. Die markierten Punkte zeigen die normalen Werte. Die Kurven geben die Beziehung zwischen dem Gefäßinnendruck (bei einem Außendruck von null) und dem Volumen, das die Gefäße enthalten, wieder. Venen sind stärker dehnbar und haben eine höhere Kapazität als Arterien, d.h. beispielsweise, dass sich der Venendruck erst dann um 1 mmHg erhöht, wenn 200 ml Blut zugeführt werden; bei den Arterien genügt dazu 1 ml Blut.

Auslegung eines Oszillometrischen Drucksensors

- Pulsatile Gefäßdehnung bei peripheren Arterien ca. 2-8%
- Durchmesser Radialis (Handgelenk) ca. 2mm
- Durchmesser Brachialis (Oberarm) ca. 4mm
- Manschette Biocomfort Blutdruckmesser 70mm x 200mm x 0.5mm = 7000mm³
- Volumen der Radialis über 70 mm Länge ca. 210 mm³
- Volumenänderung ca. $1.05^2 = 1,1025$ entspricht ca. 10% oder ca. 21 mm³
- Bezogen auf das Manschettenvolumen ergeben sich ca. $20/7000 = 0,3\%$ Volumenänderung
- $PV = \text{const.}$ Daraus folgt ebenso eine Druckänderung um ca. 0,3% in der Manschette



Volumenpuls



Kapazitiver Drucksensor

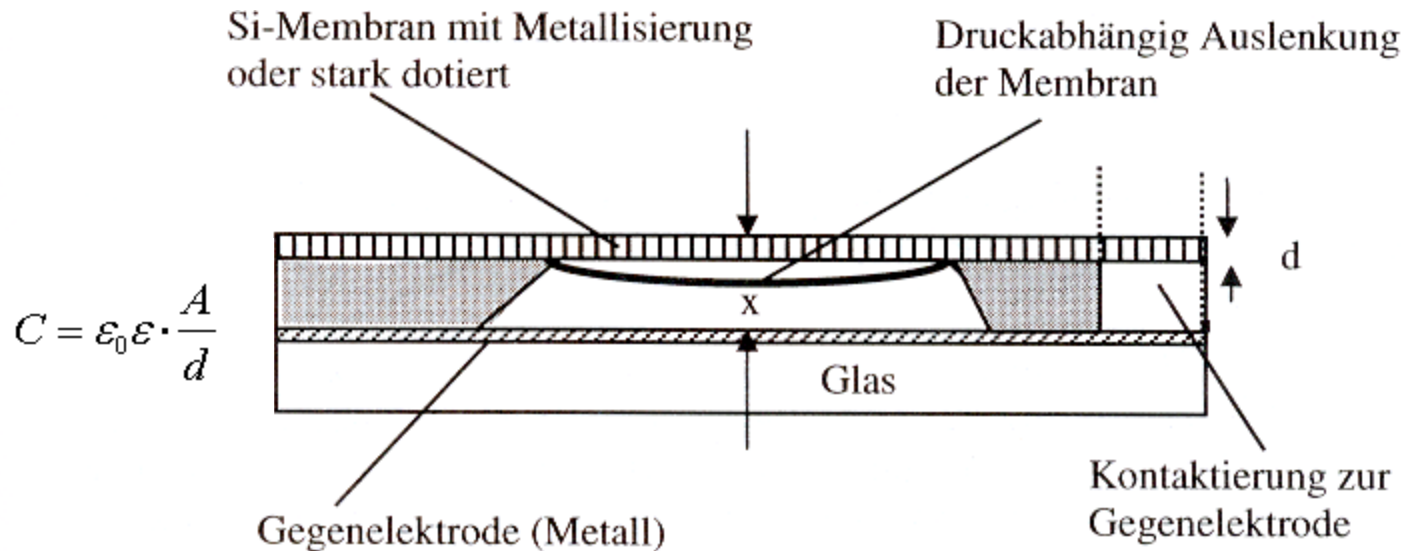
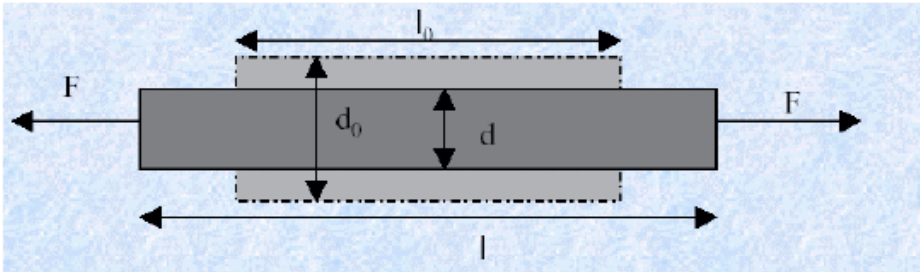


Bild 3.16: Prinzipieller Aufbau eines kapazitiven Drucksensors. Die Kapazität wird durch die Metallisierung der Glasplatte realisiert. Hochdotiertes Si (p^+) kann direkt als Gegenelektrode fungieren.

Eigenfrequenz:
$$\omega = \frac{1}{R \cdot C} = \frac{d}{R \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot A}$$

Dehnmessstreifen DMS

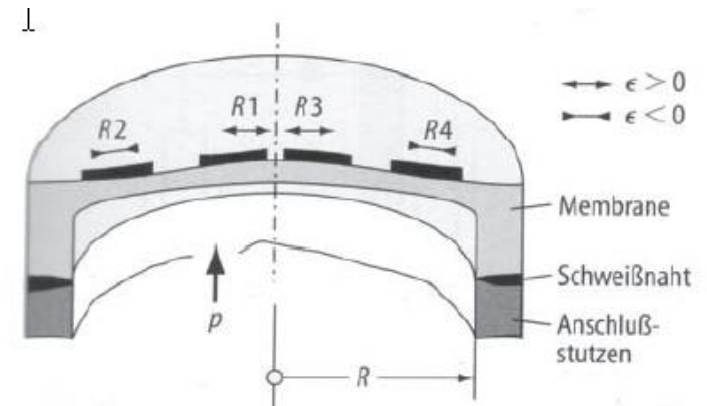
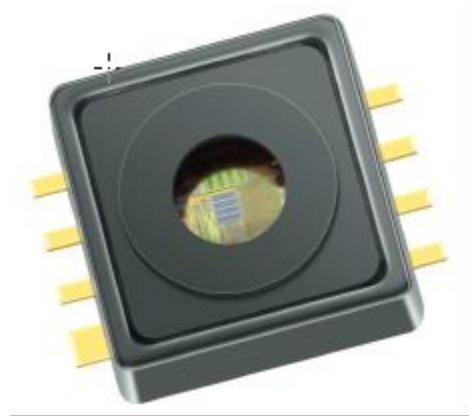
Piezoresistive Sensoren nutzen den Effekt, dass sich der spezifische Widerstand unter Druck ändert.



Wird auf ein Element, z. B. auf ein Kreisförmiges, Druck ausgeübt, so ändert sich sein Querschnitt und seine Länge.

$$R = \rho_0 \cdot \frac{l}{A} = \rho_0 \cdot \frac{l}{\pi \cdot r^2}$$

Druckmessdose mit
Widerstandsbrücke

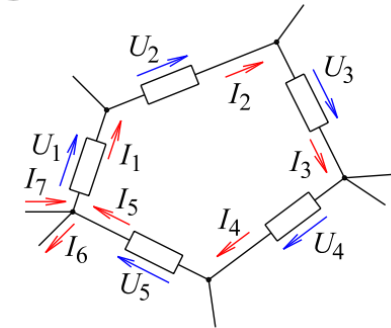
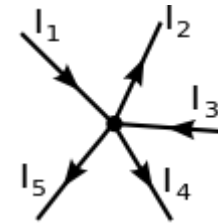
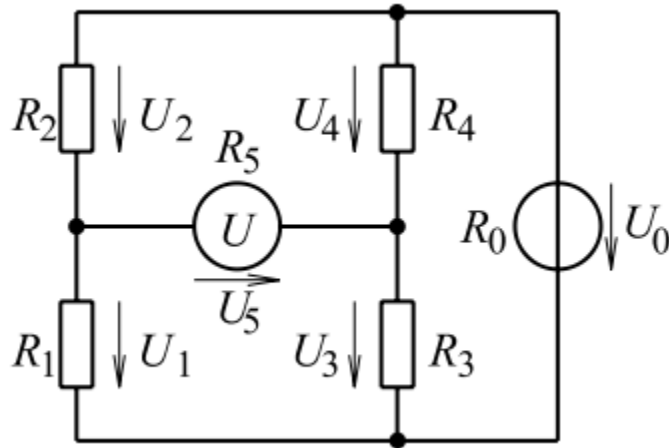


Wheatson'sche Brückenschaltung zur Widerstandsmessung

Kirchhoff'sche Gesetze
Knoten-, Maschenregel

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0$$



■ $U_5 = 0 \Rightarrow R_1 R_4 = R_2 R_3$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Diese Gleichung besagt: Wenn drei Widerstände bekannt sind, kann man einen vierten berechnen. Das liefert eine Messmethode zur Widerstandsmessung, die man auch **Nullabgleichsmethode** der Wheatstone-Brücke nennt.

$$U_1 = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_3 = U_0 \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

$$U_5 = U_1 - U_3 = U_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

$$= U_0 \frac{R_1 R_4 - R_3 R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Brückenschaltungsvarianten

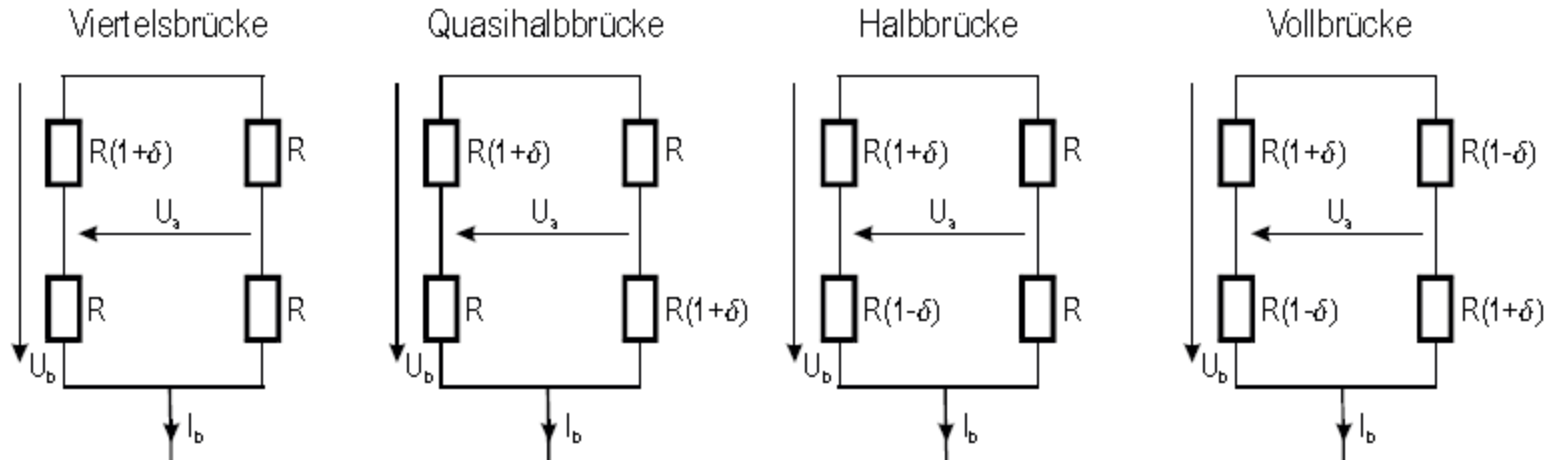


Bild 3: Vier Varianten von Brückenschaltungen aus[4]

Tabelle 1: [Ausgangsspannung¹⁾ von DMS-Brückenschaltungen als Funktion der Dehnung ($\delta = \epsilon \cdot k$) [4]

	Viertelbrücke	Quasihalbbrücke	Halbbrücke	Vollbrücke
Spannungsquelle als Brückenversorgung	$\frac{U_a}{U_b} = \frac{\delta}{4 + 2 \cdot \delta}$	$\frac{U_a}{U_b} = \frac{\delta}{2 + \delta}$	$\frac{U_a}{U_b} = \frac{\delta}{2}$	$\frac{U_a}{U_b} = \delta$
Stromquelle als Brückenversorgung	$\frac{U_a}{I_b \cdot R} = \frac{\delta}{4 + \delta}$	$\frac{U_a}{I_b \cdot R} = \frac{\delta}{2}$	$\frac{U_a}{I_b \cdot R} = \frac{\delta}{2}$	$\frac{U_a}{I_b \cdot R} = \delta$
Empfindlichkeit	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Linearitätsfehler	mit Stromquelle geringer Lin.Fehler	mit Stromquelle kein Lin. Fehler	Kein Lin. Fehler	kein Lin Fehler

¹⁾ Formel gelten nur für stromlose, hochohmige Messung der Brückenmittenspannung U_a

Drucksensor im Oszillometrischen Blutdruckmesser

- Druckänderung bei Systole um ca. 0,3%
- Welchen Druckbereich braucht der Drucksensor?
- Welche Auflösung muss der Drucksensor haben?



Auslegung Drucksensor

- Maximaler Manschettendruck:
 - Ca. 250mmHg + Atmosphärendruck
- Minimaler Manschettendruck
 - Ca. 40 mmHg + Atmosphäre
- =>Dynamik ca. 200mmHg
- Nötige Auflösung der Druckschwankung ca. 1 mmHg
- 40 mmHg Pulsamplitude erzeugen ca. 0,3% Druckänderung in der Manschette => Sensorauflösung ca. 0,01% oder 0,02mmHg
- Bitbreite des A/D Wandlers ca. 14-15 Bit

<http://www.sensortechinics.com/en/products/pressure-sensors-and-transmitters/amplified-pressure-sensors/hce/index.html>

