

1. Grundlagen zu Aufbau und Funktion der Arterien

1.1 Mechanik des Gefäßsystems

Das Herz-Kreislaufsystem (Herz, Arterien, Kapillaren, Venen) gewährleistet den Stoffaustausch zwischen Blut und Geweben und steht im Dienst der Thermoregulation [2].

Die arteriellen Gefäße sind ein System dehnungs- und kontraktionsfähiger, lebender Röhren, die sich der Herzarbeit und dem Blutbedarf der inneren Organe in idealer Weise anpassen können. Der Kreislauf ist darauf eingestellt, den Blutbedarf bei möglichst geringer Herzarbeit sicherzustellen; die Anpassung an die Bedürfnisse des Organismus erfolgt sowohl durch das Herz als auch durch die Arterien, Venen und das Kapillarnetz.

Das Herz treibt während der Systole das Blut in die Aorta. Mit jeder Kontraktion des linken Ventrikels wird Blut in das arterielle Gefäßsystem gepresst. Dabei wird besonders der stark elastische Anfangsteil der Aorta nach Art eines Windkessels gedehnt und so in ihm Energie gespeichert. Beim Nachlassen der dehnenden Kraft -mit dem Ende der Systole- bewegt die in der Aortenwand gespeicherte Energie in Form elastischer Kraft das Blut weiter. Auf diese Weise wird der diskontinuierliche Blutstrom in einen kontinuierlichen umgewandelt. Die Ausweitung und nachträgliche Kontraktion des Aortenansfangs verläuft von dort wellenförmig über die gesamte Aorta und nachgeschalteten Arterien[2, 215].

1.2 Allgemeiner Aufbau der Arterienwand

Grundsätzlich sind alle Arterien durch einen dreischichtigen Aufbau charakterisiert:

- Tunica intima (Intima)
- Tunica media (Media)
- Tunica adventitia (Adventitia)

Nach dem allgemeinen Wandaufbau wird ein elastischer und ein muskulärer Wandtyp der Arterien unterschieden, denn die Arterienmedia ist durch den wechselnden Anteil elastischer Fasern und durch die im Verhältnis zur Weite dicke Schicht glatter Muskelzellen charakterisiert. Zum elastischen Typ gehören der Truncus pulmonalis, die Arteria carotis communis oder die Arteria subclavia und die größte Arterie des menschlichen Körpers, die Aorta. Wegen des großen Gehaltes an elastischen Fasern in der Tunica media erscheinen die Arterien vom elastischen Bautyp makroskopisch gelblich. Die Gefäße vom elastischen Typ transportieren das Blut zu den muskulären Arterien, den eigentlichen Versorgungsgefäßen. Sie werden aufgrund der Windkesselfunktion auf Dehnung beansprucht. Bei den muskulären Arterien dagegen

besteht die Tunica media aus dicht gelagerten, schraubenförmig angeordneten glatten Muskelzellen mit nur wenig elastischem und kollagenem Bindegewebe [73].

1.3 Die Aorta in Maß und Zahl

Anzahl im Körper	1
Länge in mm	400
Durchmesser in μm	20.000-25.000
Querschnitt in cm^2	4
Oberfläche in cm^2	126
Volumen in cm^3	30
Mittlerer Druck in mmHg	105
Strömungsgeschwindigkeit in mm/s	1.000
Pulswellengeschwindigkeit in m/s	5-6
Mittlere Breite der Intima in mm	0,007-0,140
Mittlere Breite der Media der Aorta th.asc. in mm	1,26
Mittlere Breite der Media der Aorta th.desc. in mm	1,21-1,43
Mittlere Breite der Media der Aorta abdominalis in mm (oberhalb der Aa.renales)	0,35-0,73
Anzahl der elastischen Lamellen in der Media (Ao.th.desc. und Ao.abd.)	32-60
Breite der lamellären Einheit in μm (Ao.th.desc. und Ao.abd)	8,2-15,5
Breite der Einzellamelle	2-3 μm
Breite des interlamellären Raumes in μm	bis 25 μm
Mittlerer prozentualer Kollagengehalt	?

Tab. 1: Quantitative Angaben zur Aortenwand [116, 126, 246, 252]

1.4 Histologischer Aufbau der Aorta

Die Wand des größten elastischen arteriellen Gefäßes, der Aorta, besteht analog dem allgemeinen Wandaufbau der Arterien aus drei histologisch voneinander abgrenzbaren Schichten:

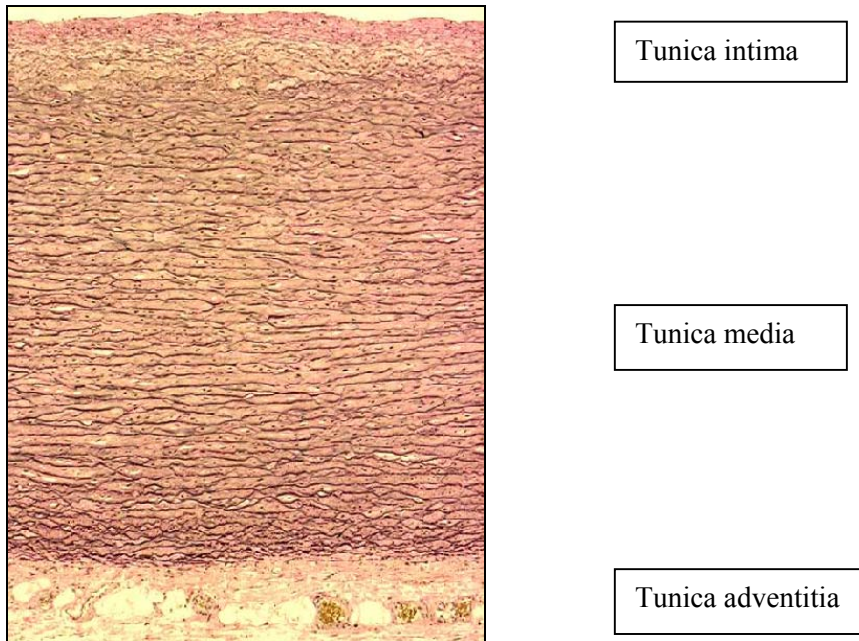


Abb. 1: Übersicht des allgemeinen Wandaufbaus der Aorta (EvG nach Verhoeff)

1.4.1 Tunica intima (T. intima, Intima)

Die T. intima besteht aus polygonalen Endothelzellen abgeflachter Form, deren Zellkerne sich in das Lumen vorwölben, einer endothelialen Basalmembran und lockerem Bindegewebe.

Das Endothel wird heute als ein hochdifferenzierter, stoffwechselaktiver Regulator verschiedener Funktionen angesehen. Interaktionen zwischen dem Blut und der Gefäßwand sowie dem umliegenden Gewebe werden vom Endothel selbst gesteuert, Hauptfunktionen des Endothels sind Veränderungen des Gefäßwandtonus, antithrombogene Wirkung, die Kontrolle von Austauschvorgängen, es spielt bei der Blutgerinnung, aber auch bei der Entstehung krankhafter Zustände eine wichtige Rolle.

Das Endothel enthält zahlreiche Wirkstoffe bzw. deren Vorstufen [165]. Endotheliale Substanzen greifen in das fibrinolytische System ein. Heparansulfat, das im Endothel gespeichert wird, und Thrombomodulin sind zwei wichtige Substanzen mit antikoagulatorischem Potential [2].

Durch eine dünne Basalmembran ist das subendotheliale lockere Bindegewebe vom Endothel getrennt. Das lockere Bindegewebe enthält elastische Fasern und Fibroblasten sowie einzelne glatte Muskelfasern [73], die sogenannten myointimalen Zellen. Die normale Intima im mittleren Lebensalter weist einen retikulären Bau auf [52].

1.4.2 Tunica media (T. media, Media)

Die T. media der Aorta besteht aus ca. 50-75 Lagen elastischer fenestrierter Lamellen (Abb. 2c, → 1) von etwa 2-3 µm Dicke, die sich konzentrisch um das Lumen anordnen [73]. Die elastischen Lamellen werden von den glatten Muskelzellen produziert [73]. Eine elastische Lamelle und die angrenzende interlamelläre Zone (Abb. 2c, →3) wird lamelläre Einheit genannt [262], zwei benachbarte elastische Lamellen mit dem dazwischen liegenden interlamellären Raum werden ebenfalls als lamelläre Einheit verstanden [211]. Die innerste elastische Membran wird -allgemein anerkannt- als Lamina elastica interna und die äußerste (zur Adventitia hin) als Lamina elastica externa bezeichnet [165].

Kollagene Fasern liegen im Zwischenraum der elastischen Lamellen und zeigen eine circumferente Ausrichtung [261, 262]. Sie sind der Gefäßwand locker aufgelagert, gelegentlich gefältelt [215].

Das zelluläre Element der Tunica media, die glatten Muskelzellen (Abb. 2c, → 2), die spiralförmig angeordnet sind, inserieren als Spannmuskeln mit ihren Endausläufern an den elastischen Lamellen und verbinden sich somit zu einem „elastisch-muskulären System“ [15, 73]. In der Tunica media liegen außerdem zarte Elastinfasern (Abb. 2c, → 4); zwischen den einzelnen elastischen Fasern bestehen zahlreiche Verbindungen, Kollagenfasern und elastische Lamellen sind nicht miteinander verbunden [262]. Alle Bestandteile der Media sind in eine basophile metachromatische Grundsubstanz (Matrix) eingebettet, deren Hauptelement Glycosaminoglycane sind [15, 73, 127].

Eine enge Assoziation von Elastin- und Kollagenfasern mit den glatten Muskelzellen garantieren der Aortenwand eine hohe Zugfestigkeit und Dehnbarkeit; die Dehnbarkeit ist in erster Linie auf die elastischen Strukturen zurückzuführen, durch die die dehnenden Kräfte gleichmäßig verteilt werden [31, 32, 262]. Die elastischen Fasern ermöglichen eine druckpulssynchrone Weitung des Arterienrohres, wobei die Wandspannung proportional zur Längenzunahme der elastischen Fasern steigt. Sie lassen sich leicht um das Vielfache ihrer ursprünglichen Länge dehnen und setzen ohne Aufwand von biomechanischer Energie der dehnenden Kraft des Blutstromes einen Widerstand entgegen [2].

Die kollagenen Fasern (Typ I-, Typ III- und Typ V-Kollagen) besitzen keine nennenswerte Dehnbarkeit, hier steigt die druckvermittelte Wandspannung auch ohne größere Dehnung; die

mechanische Festigkeit ist sehr hoch [196]. Die Kollagenfasern nehmen den größten Teil des tangentialen Druckes auf. Sie setzen einer Dehnung sehr viel mehr Widerstand entgegen als die elastischen Fasern und üben daher erst Druck aus, wenn die Gefäßwand einen großen Dehnungsgrad erreicht hat [215]. In Abhängigkeit vom Gefäßdurchmesser wirken die elastischen und kollagenen Fasern den dehnenden Kräften entgegen, sie werden aufgrund ihres unterschiedlichen Elastizitätsmoduls und ihrer unterschiedlichen Dehnbarkeit mit einem „Zwei-Phasen-Material“ verglichen [261].

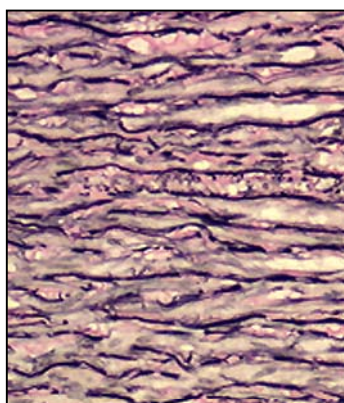


Abb. 2a (EvG, x100):

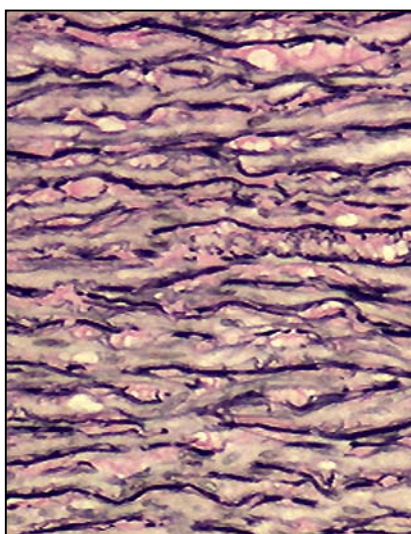


Abb. 2b (EvG, x250):

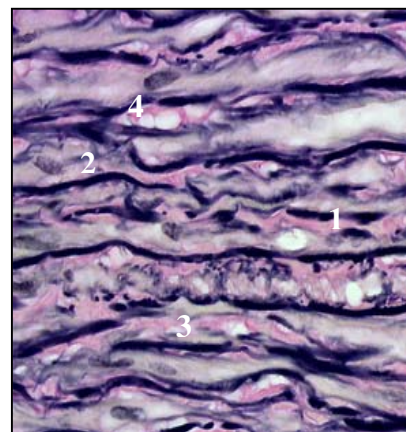


Abb. 2c (EvG, x330):

Abb. 2a-c:

Detailaufnahmen der Aortenmedia (L-Nr. 247-03) mit den einzelnen Strukturelementen (EvG nach Verhoeff), 1→ elastische Lamelle, 2→ Kern einer glatten Muskelzelle, 3→ interlamelläre Raum, 4→ kollagene Faser

1.4.3 Tunica externa (T. adventitia, Adventitia)

Die Tunica externa besteht aus schraubenartig angeordneten kollagenen Fasern und weist wenige elastische Fasern auf. Bei Arterien vom elastischen Typ ist sie verhältnismäßig gering ausgebildet. In ihr verlaufen kleine Blut- und Lymphgefäße (Vasa vasorum), die verschieden weit in den äußeren Mediaanteil einstrahlen können. In der Adventitia verlaufen außerdem Nerven; gegen die Tunica media sind die kollagenen Fasern der Adventitia dichter gelagert [73].

1.5 Architektur der Aorta ascendens

Fast 100.000 mal am Tag kommt es zu einer Extrembelastung des Anfangsteiles der Aorta, die Wandstrukturen werden verformt und müssen im Bruchteil einer Sekunde ihre Ausgangsform wiedergewinnen [215].

Orsós-Debrecen [179] beschreibt die Wandstruktur im Anfangsteil der Aorta: „...Wegen der besonderen Beanspruchung durch den Blutstrom liegen die sogenannten Faszikel, bestehend aus elastischen Fasern gerüstkförmig innerhalb der Media, besonders in der inneren Mediaschicht. Diese Bindegewebsbündel bilden durch eine Vielzahl von Verbindungen mit dem Grundgerüst eine funktionelle Einheit. Oberhalb der Klappenebene finden sich im hinteren Wandanteil der Aorta ascendens wenige dieser Faszikel“... Die Media weist im Anfangsteil unterschiedliche Stärken auf, der Autor beschreibt bereits „altersphysiologische“ Unterschiede bei der Zusammensetzung der einzelnen Gefäßwandbestandteile und verweist schon in dieser Arbeit auf erhebliche histologisch nachweisbare Aortenwandveränderungen bei makroskopisch unauffälliger Aorta im jüngeren Lebensalter.

Hellner charakterisiert den Anfangsteil der Aorta durch die unregelmäßige Architektur und den Unterschied im Gehalt der einzelnen Bindegewebskomponenten und glatter Muskelzellen als *punctum minoris resistentiae* [92].

Von Doerr wurde die komplexe Architektur der Aorta ascendens beschrieben. Der Media als funktionelles System kommt dabei eine besondere Bedeutung zu [52]. Benninghoff beschreibt die charakteristische Textur der Aortenmedia als halb- bis dreiviertelzirkuläre elastische Membranen mit dazwischen liegenden büschelförmig angeordneten Muskelfasern, die von feinsten kollagenen Fibrillen umspinnen sind und charakterisiert sie als Spannungsapparat [15].

1.6 Pathologische Lumenveränderungen der Aorta

Der Blutzufluss zu den Organen wird normalerweise durch Weitenänderung der muskulären Arterien, besonders der peripheren Widerstandsgefäße der Arteriolen reguliert [215]. Diese Aufgabe übernimmt die glatte Muskulatur der Gefäßwand, die vom autonomen Nervensystem und den Hormonen des Nebennierenmarks gesteuert wird.

Durch unterschiedliche Mechanismen verursachte pathologische Veränderungen der Wandstrukturen der Arterien führen zur Erweiterung oder Verengung des Lumens. Die Art der Veränderung und Qualität des befallenen Blutgefäßes bestimmen Folgen und Komplikationen.

Lumenerweiterungen der Aorta können mit und ohne strukturelle Veränderungen der Wandarchitektur einhergehen. Diffuse Erweiterungen ohne wesentliche Veränderungen der Gefäßwand bezeichnet man als Dilatation bzw. diffuse Ektasie [165, 196].

Umschriebene Erweiterungen ohne wesentliche Strukturveränderungen der Gefäßwand bezeichnet man als Ektasie, umschriebene Erweiterungen mit strukturellen Veränderungen der Gefäßwand werden als *Aneurysma* bezeichnet [165].

Gefäßverengungen (Stenosen) und Gefäßverschlüsse werden an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt.