

Aus dem Anatomischen Institut der Universität Zürich
(Direktor: Prof. Dr. GIAN TÖNDURY)

DIE ENTSTEHUNG DER LÄNGSMUSKULATUR IN DEN ÄSTEN DER A. BRONCHIALIS*

Von

EWALD WEIBEL

Mit 21 Textabbildungen

(Eingegangen am 29. Oktober 1957)

Inhalt		Seite
Einleitung		440
I. Die Veränderungen im Wandbau der Äste der A. bronchialis im Laufe des Lebens		444
a) Material und Methode. S. 444. — b) Befunde. S. 444. — c) Diskussion. S. 447. —		
d) Folgerung und weitere Fragestellung. S. 450.		
II. Experimentelle Erzeugung von innerer Längsmuskulatur in Arterien.		450
a) Versuchsanordnung. S. 450. — b) Befunde. S. 451. — c) Diskussion. S. 459. —		
d) Folgerung. S. 461.		
III. Abhängigkeit des Vorkommens von Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis von der respiratorischen Dehnungsintensität der Bronchuswand		461
a) Fragestellung. S. 461. — b) Material und Methode. S. 462. — c) Befunde. S. 462. —		
d) Diskussion. S. 464.		
IV. Zusammenfassung und Schlußfolgerung		464
Zusammenfassung		467
Literatur		467

Einleitung

WATZKA (1936) beschreibt Arterien, deren Tunica interna Längsmuskelfasern in unterschiedlicher Menge und Anordnung aufweist. Er bezeichnet diese als „Drossel- oder Sperrarterien“ in der Annahme, die verschiedenen Bilder seien der Ausdruck verschiedener Zustände eines reversiblen Kontraktions-Dilatationsvorganges gleichartig gebauter Gefäße: Die bei der Kontraktion eintretende Dickenzunahme des Längsmuskelpolsters soll die einengende Wirkung der Mediaringmuskulatur beim vollständigen Verschuß der Gefäßlichtung ergänzen. Diese „Drossel- und Sperrarterien“ sollen besonders der Steuerung des Blutzuflusses zu arteriovenösen Anastomosen dienen (v. SCHUMACHER 1915, CLARA 1927, WATZKA 1936, MATHIS und EGLITIS 1937, v. HAYEK 1940, MAERK 1941, VERLOOP 1948, HIRSCH 1949—1957, LAPP 1951 u. a. m.).

Arterien mit innerer Längsmuskulatur wurden in vielen Organen gefunden, so im Myokard (BUCHER 1944, CONTI 1945, HIRSCH 1949—1957, HIERONYMI 1956 u. a.), in den Vasa vasorum der Aorta ascendens (NEUMANN 1939, Koecher 1941, LAURENT 1944), in wachsenden Schilddrüsenadenomen (RATZENHOFER 1953), im Magen (BOSESNECK 1956 u. a.), im Oesophagus (CONTI und PASARELLI 1951), im Penis (CONTI 1950) usw.

Diesen „Sperrarterien“ wird aber erst besondere Beachtung geschenkt, seit v. HAYEK (1940) auf ihr Vorkommen in der Lunge aufmerksam gemacht hat. Er

* Ausgeführt mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung.

beschreibt sie im Zusammenhang mit Anastomosen zwischen der A. pulmonalis und der A. bronchialis einerseits, und solchen zwischen der A. bronchialis und dem Plexus venosus peribronchialis andererseits, weshalb er diese „Rami pulmonobronchiales“ als arteriovenöse Anastomosen zwischen der A. pulmonalis und dem Plexus venosus peribronchialis ansieht. Diese Verhältnisse sind seither wiederholt untersucht worden (MERKEL 1941, VERLOOP 1948, LAPP 1951, PRETO PARVIS 1954 u. a. m), wobei u. a. die Zugehörigkeit der „Sperrarterien“ zum Astwerk der A. bronchialis erkannt wurde, im übrigen aber die Ansichten v. HAYEKS weitgehend bestätigt worden sind.

Die „Sperrarterien“ sind heute als besondere kreislaufregulierende Einrichtung anerkannt und es wird ihnen eine solche Bedeutung zugemessen, daß Pathologen bereits über die „Erkrankung der Sperrarterien“ schreiben (KOENN 1955/56).

Wie wir anlässlich unserer eigenen Untersuchungen (TÖNDURY und WEIBEL 1956) feststellten, kommen in der menschlichen Lunge solche „Sperrarterien“ nicht nur in Beziehung zu den erwähnten Anastomosen vor. Längsmuskelfasern finden sich besonders in kleineren Bronchialarterien von etwa 0,2—0,8 mm Durchmesser, deren Tunica media aus 2—6 Ringmuskelfaserlagen besteht. Die Membrana elastica interna ist in mehrere längsverlaufende elastische Faserlamellen aufgesplittert, welche das Längsmuskelbündel durchsetzen. Man nimmt an, dieses liege im Bereich der Tunica interna, genauer in der Membrana elastica interna. Neben dieser inneren Längsmuskulatur kommen ausnahmsweise auch Längsmuskelfasern im Bereich der Membrana elastica externa und selten in der Tunica media vor.

Die Längsmuskelzüge zeigen in ein- und derselben Lunge von Arterie zu Arterie große Unterschiede in bezug auf Menge und Anordnung. Wir wollen sie zur Vereinfachung der folgenden Darstellung in 4 Typen (1—4, Abb. 1—5) einteilen, wobei die Grenzen künstlich gezogen werden müssen, da alle Übergangsformen anzutreffen sind. Vom 11. Lebensjahr an (vgl. S. 447) finden sich in Lungen aller Altersstufen Bronchialarterien mit einzelnen, leicht übersehbaren

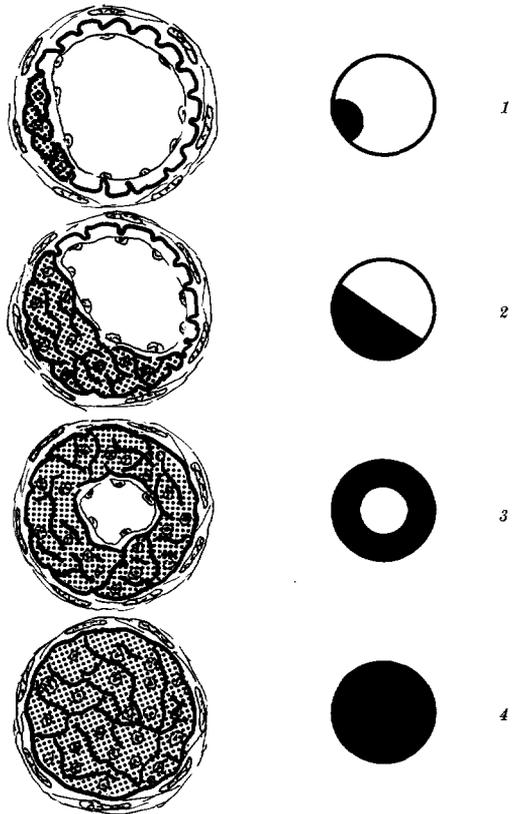


Abb. 1. Ausbildung von Längsmuskulatur und Vermehrung der elastischen Fasern der Membrana elastica interna. Schematische Zeichnung. Vgl. Text

Längsmuskelfasern, welche als flaches Bündel einseitig angeordnet oder über die ganze Zirkumferenz verteilt sein können (Typ 1, Abb. 1 und 2). Mit zunehmender

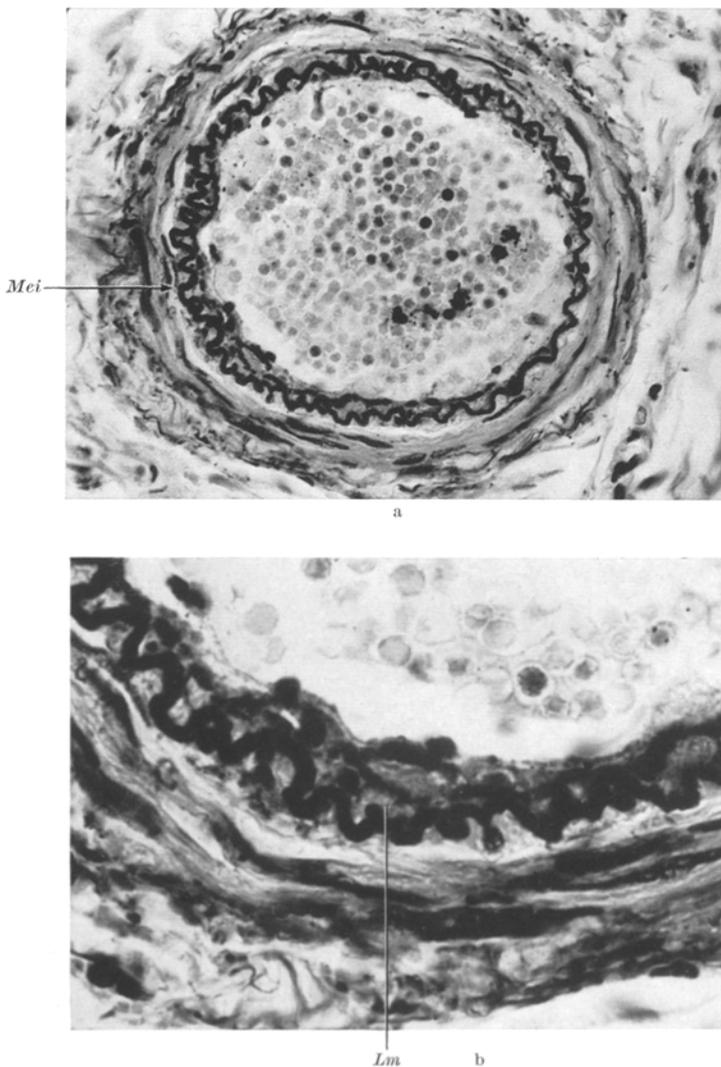


Abb. 2 a u. b. A. bronchialis aus der Lunge eines 18jährigen Mannes. Beginnende Aufsplitterung der Membrana elastica interna (*Mei*) und Einlagerung von spärlichen Längsmuskelfasern (Typ 1). Elastinfärbung. b Ausschnitt derselben Arterie bei stärkerer Vergrößerung. Beachte die enge Beziehung zwischen elastischen Lamellen und Längsmuskelfasern (*Lm*). Elastinfärbung

Ausbildung können kräftige, einseitige Bündel (Typ 2, Abb. 1 und 3) oder Längsmuskelhülsen entstehen, welche die Lichtung allseitig umfassen (Typ 3, Abb. 1 und 4). Im Extremfall hat die Längsmuskulatur die Gefäßlichtung vollständig verdrängt, sodaß diese verödet (Typ 4, Abb. 1 und 5). Solche Gefäße erscheinen im Schnitt einfach als Muskelbündel, welches von vielen kräftigen elastischen Lamellen durchsetzt ist (Abb. 5).

Jeder beliebige Ast der A. bronchialis kann also über eine lange Strecke Längsmuskelfasern enthalten, ohne irgendeine Anastomose zu bilden, welche eine

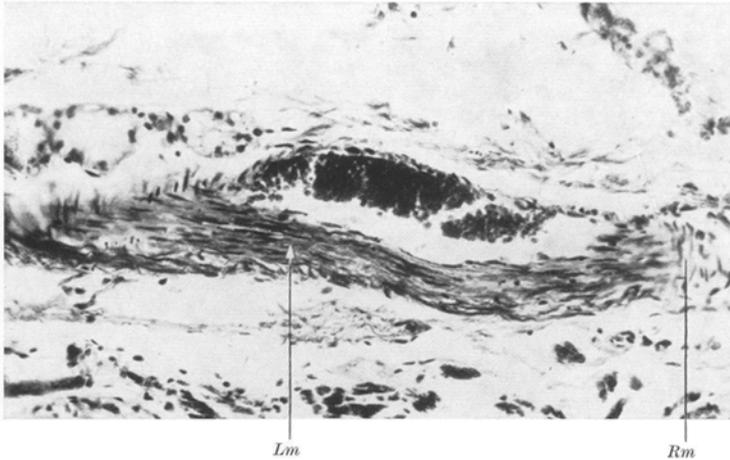


Abb. 3. A. bronchialis. 26jähriger Mann. Einseitige Anordnung des kräftigen Längsmuskelbündels (*Lm*) bei dünner, einschichtiger Tunica media (*Rm*) (Typ 2). Längsschnitt. Goldner-Färbung

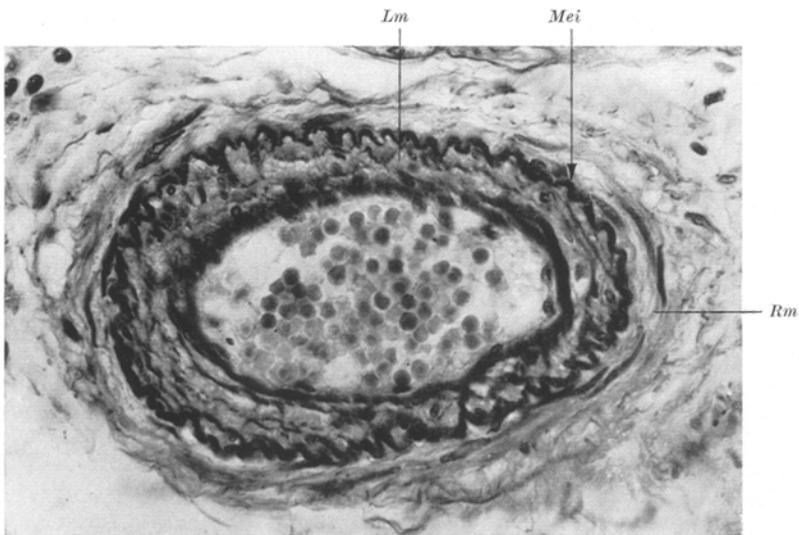


Abb. 4. A. bronchialis. 21jähriger Mann. Die Längsmuskulatur (*Lm*) ist konzentrisch in Form einer gültigen Hülle um den ganzen Umfang des Gefäßes angeordnet (Typ 3). Zwischen den Muskelfasern liegen viele elastische Fasern und Lamellen, welche mit der Membrana elastica interna (*Mei*) zusammenhängen. Relativ schmale Tunica media (*Rm*). Elastinfärbung

spezielle Drosselvorrichtung verlangen würde. Auf Grund dieser von den heute gültigen Angaben abweichenden Beobachtung schien es uns angezeigt, die Frage der Arterien mit innerer Längsmuskulatur erneut anzugehen.

Die Beantwortung der folgenden 3 Fragen soll einen Beitrag zum Verständnis der Bedeutung der inneren Längsmuskulatur in Arterien, im besonderen in den Ästen der A. bronchialis, leisten:

a) Wann treten die Längsmuskelfasern in den Ästen der A. bronchialis von Lungen normaler Individuen erstmals auf und welche Veränderungen erfahren sie im Laufe des Lebens?

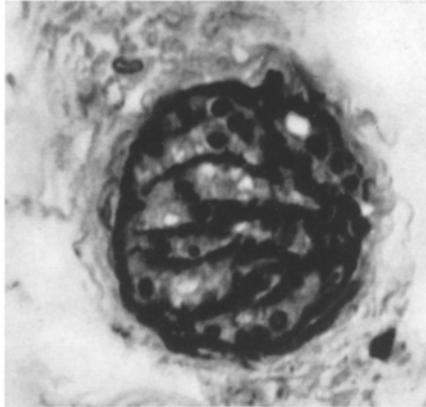


Abb. 5. A. bronchialis, 18jähriger Mann. Extrem starke Ausbildung der Längsmuskulatur mit kräftigem elastischem Gerüst. Lichtung verödet (Typ 4)

b) Lassen sich diese Längsmuskelfasern experimentell erzeugen?

c) Sagt die Verbreitung der Bronchialarterienäste mit Längsmuskulatur in der Lunge etwas über deren Bedeutung aus?

Die Fragen b und c sollen nach der Diskussion der ersten Frage präzisiert werden (s. S. 450).

I. Die Veränderungen im Wandbau der Äste der A. bronchialis im Laufe des Lebens

a) Material und Methode. Zur Abklärung der Frage nach dem Zeitpunkt des Auftretens von innerer Längsmuskulatur in den Bronchialarterien untersuchten wir Serienschritte durch normale Lungen von Feten, Neugeborenen, Kindern und Erwachsenen bis zum 50. Altersjahr. Leider standen uns keine gesunden Lungen von Individuen zwischen dem 12. und 17. Lebensjahr und im 4. Lebensjahrzehnt zur Verfügung, doch stören diese Lücken unsere Ergebnisse nicht, obwohl es wünschenswert wäre, gerade bei Jugendlichen umfangreichere Kenntnisse der Gefäßstrukturen zu besitzen.

Färbungen: wechselweise mit Hämalaun-Eosin, mit Resorzin-fuchsin-Kernechtrot-Pikroindigo, um die Verhältnisse der elastischen Wandelemente zu studieren, mit der Trichromfärbung nach GOLDNER, welche Muskelfasern von Bindegewebsfasern unterscheiden läßt.

b) Befunde. Wie die Untersuchung fetaler Lungen zeigte, besteht die Wand der Bronchialarterien zuerst aus einem nackten Endothelschlauch, dem sich nach und nach eine einschichtige Hülle deutlich zirkulär angeordneter Muskelzellen (Abb. 6) und eine Membrana elastica interna mit längsgerichteten, zarten Fasern anlegen. Dadurch lassen sie sich schon frühzeitig von nur endothelbekleideten Gefäßen des Plexus venosus peribronchialis unterscheiden. Außerdem ist ihre regelmäßige, enge Nachbarschaft zu Nervenbündeln charakteristisch. Längsmuskelfasern sind keine zu finden, weder in Beziehung zu bronchopulmonalen Anastomosen (Abb. 6), noch in irgendwelchen anderen Ästen der A. bronchialis.

Ähnliche Verhältnisse finden wir in der Lunge des Neugeborenen (Abb. 7). Die kleineren peripheren Äste zeigen noch den einschichtigen Bau der Tunica

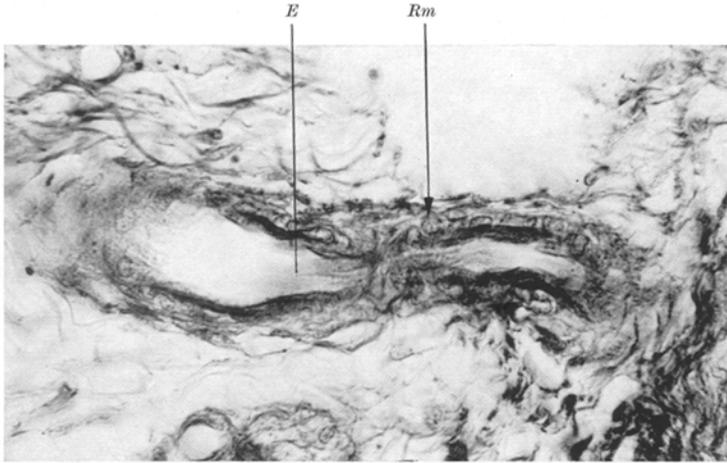


Abb. 6. A. bronchialis aus der Lunge eines menschlichen Fetus von 132 mm SSL. Längsschnitt. Azanfärbung. Die Wand besteht aus Endothel (*E*) und einer einschichtigen zirkulären Tunica media (*Rm*). Das Gefäß gehört einer bronchopulmonalen Anastomose an

media, während die größeren, zentralen bereits zwei- oder mehrere Ringmuskelschichten aufweisen. Für die größeren Äste ist eine kräftige Membrana elastica

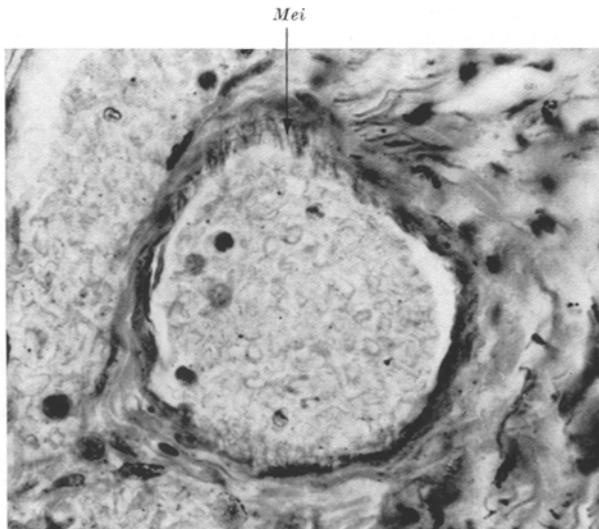


Abb. 7. A. bronchialis aus der Lunge eines neugeborenen Menschen. Elastinfärbung. — Die Membrana elastica interna besteht aus feinsten Längsfäserchen (*Mei*)

interna und ein in Ausbildung begriffenes Stratum elasticum longitudinale externum der Adventitia kennzeichnend, doch fehlt auch hier noch jegliche Längsmuskulatur.

Mit dem Wachstum der Lunge im Kindesalter nehmen auch Kaliber und Wand der A. bronchialis zu. Während die Bronchen bis zur Geburt von mehreren

etwa gleichkalibrigen Arterien umschlungen sind, differenzieren sich später in diesem Geflecht mehr und mehr Haupt- und Nebenstraßen aus, so daß jeder

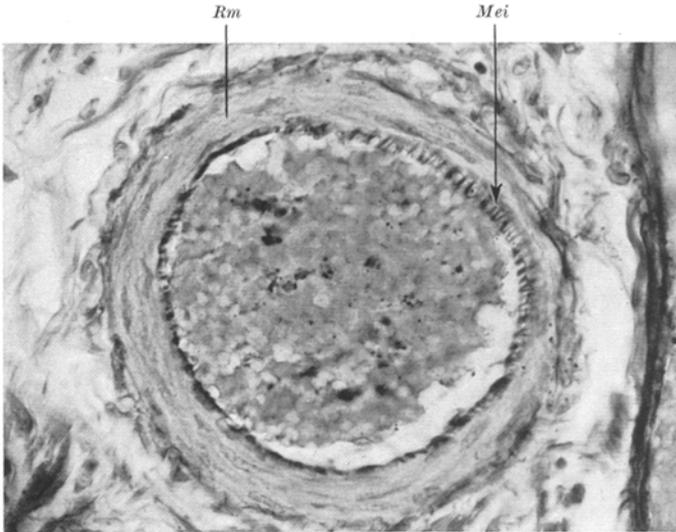


Abb. 8. A. bronchialis aus der Lunge eines 4jährigen Kindes. Elastinfärbung. — Mehrschichtige Tunica media (*Rm*). Noch zarte Membrana elastica interna (*Mei*). Keine Längsmuskulatur

Bronchus von einer oder zwei größeren Arterien und mehreren kleineren Verbindungsästen umgeben ist. Auch in der Wand kleinerer Äste besitzt die Tunica

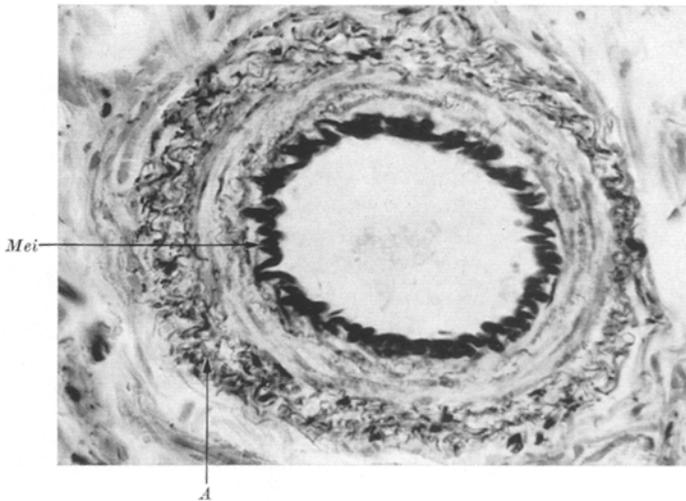


Abb. 9. A. bronchialis aus der Lunge eines 9jährigen Kindes. Elastinfärbung. — Die Membrana elastica interna (*Mei*) ist sehr viel kräftiger geworden, doch sind noch keine Längsmuskelfasern eingelagert. Das Stratum elasticum longitudinale externum der Adventitia (*A*) ist in Differenzierung begriffen

media mehrere Ringmuskelschichten (Abb. 8). Außerordentlich deutlich ist die Zunahme der Faserdicke in der Membrana elastica interna. Während diese in

anderen Organarterien gleicher Größe häutchenartig geschlossen und zart erscheint, ist sie in den Bronchialarterien in dicht gelagerte, dicke elastische Längsfasern aufgesplittert (Abb. 9), die gitterartig zu einer Membran vereinigt sind. Hingegen lassen sich bis zum 11. Lebensjahr nur ausnahmsweise Längsmuskelfasern nachweisen. Erst in diesem Alter sind an vereinzelt Stellen einzelne, leicht übersehbare Fasern zwischen elastische Lamellen, welche sich von der Membrana elastica interna abgespalten haben, eingelagert (Abb. 10). Diese veränderten Bronchialarterienäste finden sich vornehmlich in der Wand von Bronchen eines Durchmessers von 2—6 mm.

Durch weitere Anlagerung von glatten Muskelfasern kommen nach und nach eigentliche Längsmuskelbündel zustande, welche bereits im 18. Altersjahr in den verschiedensten Formen nebeneinander vorkommen können. In einem Teil dieser Arterien sind nur vereinzelt Längsmuskelfasern vorhanden (Abb. 10); bei stärkerer Ausbildung ist die Längsmuskulatur entweder zu einem einseitigen Bündel zusammengefaßt oder sie umgibt hülsenartig die ganze Gefäßlichtung (Abb. 11). Bei extremer Entwicklung vermag sie die Gefäßlichtung soweit zu verdrängen, daß diese verodet. Diese Verhältnisse sind von Mensch zu Mensch verschieden, jedoch ist hervorzuheben, daß von diesem Alter an in allen von uns untersuchten Lungen nur verhältnismäßig wenige Äste der A. bronchialis frei von Längsmuskelfasern sind.

Mit zunehmendem Alter nimmt auch die Menge der Fasern zu. Im höheren Alter, werden die Längsmuskelbündel mehr und mehr durch kollagene Bindegewebsfasern aufgelockert, die in der Jugend fehlen (Abb. 12).

Dieselben Veränderungen erfahren ungefähr zu den gleichen Zeiten die Arterien der Pleura, die ebenfalls Äste der A. bronchialis sind.

c) **Diskussion.** Aus der Darstellung unserer Befunde geht eindeutig hervor, daß die Äste der A. bronchialis ursprünglich gewöhnliche Arterien von muskulärem Bau sind, aufgebaut aus Endothel, Membrana elastica interna, Tunica media und Adventitia (Abb. 6—9). Erst sekundär, mit unauffälligem Beginn etwa im 11. Lebensjahr, werden in die Tunica interna Längsmuskelfasern eingelagert, die enge Beziehungen zu den Fasern der aufgesplitterten Membrana elastica interna haben (Abb. 10). Zuerst sind es nur einzelne Fasern, zu denen aber weitere hinzugefügt werden, bis schließlich dicke Wülste oder Manschetten ausgebildet sind, welche die Gefäßlichtung beträchtlich einengen können.

v. HAYEK (1940), MERKEL (1941), VERLOOP (1948), LAPP (1951) u. a., sehen in dieser variablen Ausbildung einen steuerbaren, reversiblen Kontraktions-Dilatationsvorgang, welcher ganz im Dienst der lokalen Kreislaufregulation steht, und durch Verschluß der Gefäßlichtung den Zustrom von Blut zu „arteriovenösen“ Anastomosen drosseln kann. Zum vollständigen Gefäßverschluß trägt nach ihrer Ansicht die Verdickung des Längsmuskelwulstes infolge Kontraktion und Verkürzung Wesentliches bei.

Unsere Untersuchungen haben eindeutig ergeben, daß die Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis erst sekundär im späteren Kindesalter auftritt, so daß wir uns fragen müssen, ob denn diese kreislaufregulierende Tätigkeit der inneren Längsmuskulatur vorher nicht nötig ist. Wir könnten uns allenfalls noch vorstellen, daß sich ihre Notwendigkeit erst nach Ingangkommen des Lungenkreislaufs bei der Geburt einstellt, jedoch fällt es uns schwer, einzusehen, weshalb

diese Drosselvorrichtung zu einem Zeitpunkt angelegt werden soll, da sich an den Kreislaufverhältnissen der Lunge nichts Wesentliches ändert.

Auf der Suche nach einer anderen einleuchtenden Erklärung für die Ausbildung dieser Längsmuskulatur fallen uns im Bereich der Lingula von Lungen

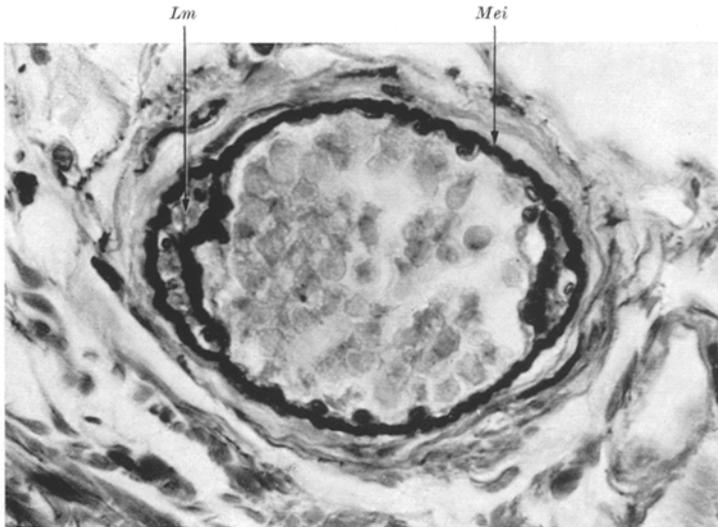


Abb. 10. A. bronchialis aus der Lunge eines 18jährigen Mannes. Elastinfärbung. — Die kräftige Membrana elastica interna (*Mei*) ist an zwei Stellen in 2 Lamellen aufgespalten, zwischen denen Längsmuskelfasern liegen (*Lm*)

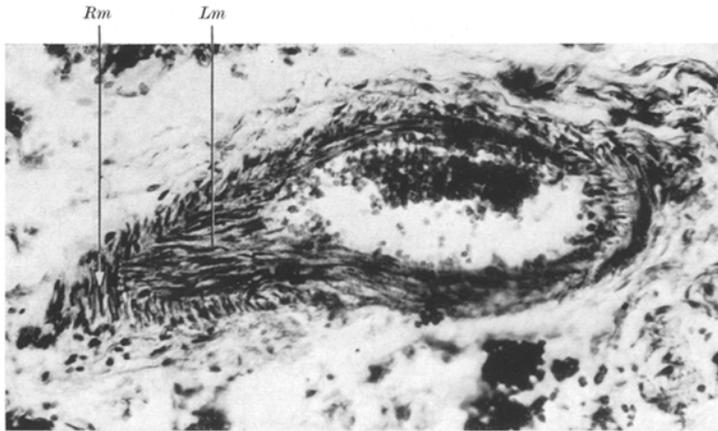


Abb. 11. A. bronchialis aus der Lunge eines 20jährigen Mannes. Wand tangential geschnitten, starke Längsmuskulatur (*Lm*) konzentrisch angeordnet. Goldner-Färbung

älterer Leute kleinere Äste der A. pulmonalis auf, deren muskulär gebaute Wand ebenfalls Längsmuskelbündel enthält. Außerdem zeigen bemerkenswerterweise die peripheren Äste von Coronararterien (s. a. BUCHER 1944, HIRSCH 1949, HIERONYMI 1956), Arterien des Uterus, der Harnblase, des Magens, des Oesophagus und des Penis gleichartige Veränderungen des Wandbaues. Die Wand einer kleineren Arterie aus dem Zwerfchell eines älteren Individuums besteht überhaupt nur aus längsgerichteten Muskelfasern und parallelen dicken elastischen Fasern.

RATZENHOFER (1953) beschreibt Arterien mit Längsmuskulatur in der Kapsel von rasch wachsenden Schilddrüsenadenomen und schreibt der Dehnung der Arterien große Bedeutung für die Genese der Veränderung zu. Zudem untersucht BOESSNECK (1956) das Psaltersegel des erwachsenen Schafes und findet typisch gebaute „Polstergefäße“ mit elastisch-muskulären Längsstrukturen in der Intima. Das Psaltersegel ist eine quere lange Schleimhautfalte, die frei und weit in die Lichtung des Psaltermagens, eines Vormagenteils der Wiederkäuer, hineinragt, und nach Angabe von BOESSNECK mechanisch beansprucht wird. Da die

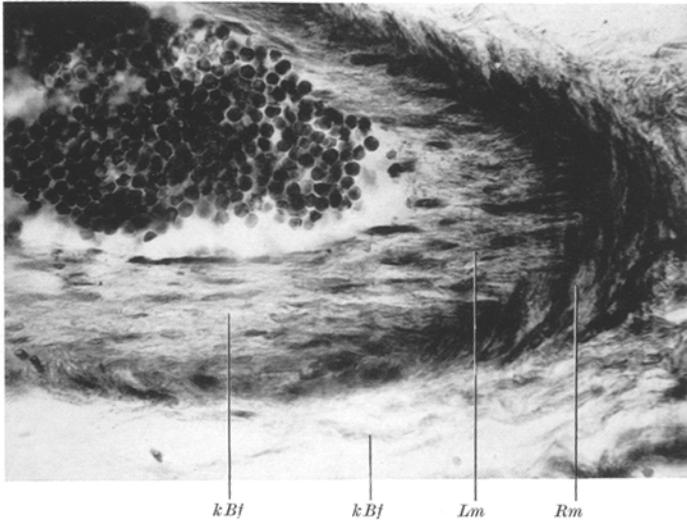


Abb. 12. A. bronchialis aus der Lunge eines 47jährigen Mannes. Schrägschnitt. Goldner-Färbung. Beachte die Auflockerung des Längsmuskelbündels (*Lm*) durch kollagene Bindegewebsfasern (*kBf*). Die Muskelfasern liegen weiter auseinander als in der Tunica media (*Rm*), dadurch erscheint das Längsmuskelbündel heller

Funktion des Psaltersegels noch nicht hinreichend bekannt ist, enthält sich BOESSNECK einer Stellungnahme zur Bedeutung dieser „Polstergefäße“, weist aber darauf hin, daß in der übrigen Wand des Magens keine solchen Gefäße zu finden sind.

In diesem Zusammenhang interessieren uns besonders auch die Untersuchungen von NEUMANN (1938) und KOECHER (1941) über die Vasa vasorum der Aorta ascendens. Die Wand des proximalsten Hauptastes, der sog. A. cardi-aortalis, besitzt ebenfalls reichlich Längsmuskulatur und elastische Längsfasern, welche oft die Ringmuskulatur der Tunica media ganz verdrängen können. LAURENT (1944) hat diese Befunde durch die Feststellung ergänzt, daß die Längsmuskelfasern der A. cardi-aortalis in der Jugend fehlen und erst mit der Zeit auftreten.

Es scheint also, daß Arterien mit Längsmuskulatur in der Tunica interna in Organen auftreten, deren Größe und Ausdehnung stark wechseln, und es fragt sich, ob die Ausbildung von Längsmuskelfasern nicht einfach eine Folge der dauernden Längsbeanspruchung der Arterien darstellt. In einer gewöhnlichen Arterie dienen vornehmlich die längsgerichteten Fasern der Membrana elastica

interna der Längselastizität. Auffallenderweise sind die Fasern der Membrana elastica interna der Bronchialarterienäste schon in der frühen Kindheit viel kräftiger als in anderen Organarterien gleicher Größe (s. o. und Abb. 9), was schon auf die besondere Beanspruchung der Bronchialarterien in der Längsrichtung hindeutet. Die später auftretenden Längsmuskelfasern liegen den vermehrten elastischen Fasern eng an, ein Verhalten, das sich wohl aus der gemeinsamen Aufgabe erklären läßt. Infolge vermehrter Beanspruchung werden die passiven elastischen Fasern durch aktive Elemente, glatte Muskelfasern, verstärkt. Bei krankhaft gesteigerter Atmung in der frühen Kindheit wird diese Verstärkung der gewöhnlichen längsverlaufenden Arterienwandelemente schon früher nötig. Das erklärt die Beobachtung von FEYRTER (1927), welcher in der Lunge eines zweijährigen Mädchens mit Keuchhusten „verschlufsfähige, längsmuskulaturführende Bronchialarterien“ fand.

d) Folgerung und weitere Fragestellung. Nach unserem Dafürhalten *steht die Ausbildung von Längsmuskulatur in der Wand der Bronchialarterienäste im Zusammenhang mit der übermäßigen Beanspruchung der Gefäße in der Längsrichtung.* Zur Stützung dieser Hypothese stellen wir die zwei folgenden Fragen:

1. Kann eine Arterie im Tierexperiment auf eine andauernde zu- und abnehmende Dehnung in der Längsrichtung mit der Ausbildung von Längsmuskulatur antworten (vgl. u.)?

2. Ist das Vorkommen von Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis abhängig vom Intensitätsgrad der respiratorischen Dehnung der Bronchuswand (vgl. S. 461)?

II. Experimentelle Erzeugung von innerer Längsmuskulatur in Arterien

a) Versuchsanordnung. Nach unserem Dafürhalten ist die Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis die Folge einer übermäßigen Beanspruchung der betreffenden Arterienäste in der Längsrichtung, weshalb wir die folgende Frage stellen:

Kann eine Arterie im Tierexperiment auf eine andauernde zu- und abnehmende Dehnung in der Längsrichtung mit der Ausbildung von Längsmuskulatur antworten?

Die Versuche wurden an jugendlichen, ausgewachsenen Ratten im Alter von 4—5 Monaten durchgeführt. Als Versuchsobjekt dienten uns Mesenterialarterienäste, welche das Dünndarmmesenterium radiär durchsetzen, von einer Vene begleitet und von Fettgewebe umgeben sind. Zwischen diesen Gefäßsträngen besteht das Mesenterium nur aus einer dünnen gefäßlosen Membran, so daß es leicht war, einzelne Gefäßstränge isoliert zu behandeln.

Um den Verhältnissen in den Bronchialarterien möglichst nahe zu kommen, verwendeten wir als „Motor“ die respiratorische Bewegung des Zwerchfells. Ein Gefäßstrang des Dünndarmmesenteriums wurde mit einem feinen Seidenfaden an das Zwerchfell fixiert (Abb. 13) und kam so unter dessen rhythmisch zu- und abnehmenden Zug zu stehen.

Operationsgang. Inhalationsnarkose mit Äther, Hautdesinfektion mit Desogentinktur. Nach medianer oberer Laparotomie fixierten wir einen feinen Seidenfaden an die linke Zwerchfellkuppel, nahe der Mittellinie und so hoch oben wie möglich, jedoch immer im muskulären Teil (Pars sternocostalis). Darauf wurde eine Dünndarmschlinge hervorgezogen und ausgebreitet (Abb. 13). Das Mesenterium hat das Aussehen einer dünnen, festen Membran, die radiär verlaufende, von reichlich Fett- und Bindegewebe begleitete Gefäße enthält. Mit derselben feinen gebogenen Nadel stachen wir etwa am Übergang des mittleren in das distale Drittel eines solchen Gefäßstranges von oben durch die feine Membran ein und durch den Rand des Fettstranges aus, im Bereich des anderen Randes wieder ein und nun durch

die Membran aus (vgl. Abb. 13). Um die Übertragung des Zwerchfellzuges auf die benachbarten Gefäßstränge zu verhindern, wurde das Mesenterium seitlich des Fadenein- und -ausstiches inzidiert. Der Seidenfaden bildete so eine Schlinge, welche den Mesenterialgefäßstrang mit dem Zwerchfell verband; die Gefäße selbst lagen aber außerhalb der Schlinge, so daß wir diese anziehen konnten, ohne eine Strangulation der Gefäße befürchten zu müssen. Der Faden wurde dreifach verknotet. Die Bauchdecken wurden mit fortlaufender Seidennaht, die Haut nach subcutaner Applikation von Sulfonamidpuder mit Einzelknopfnahnt verschlossen. Als Wundverband diente ein Nobecutan-Spray.

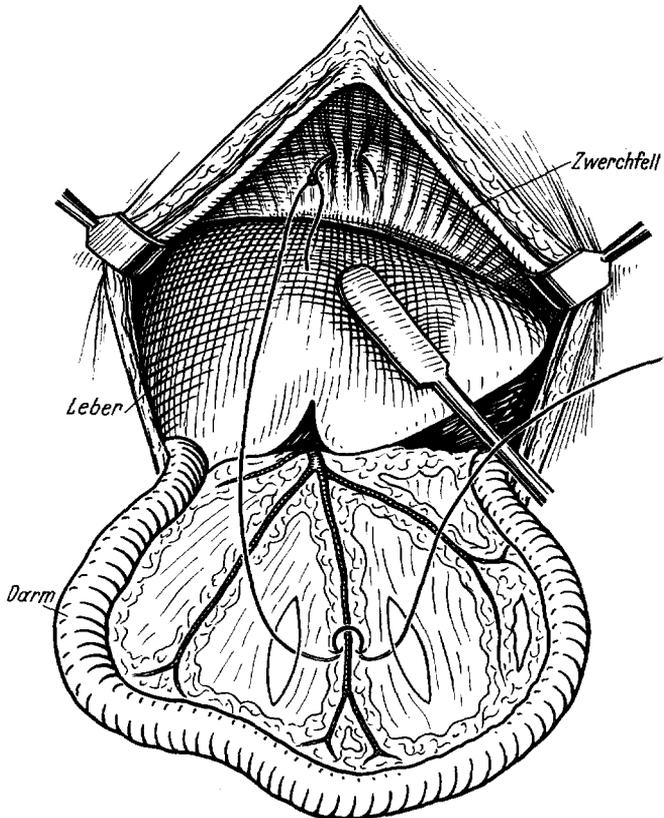


Abb. 13. Operationskizze. Ein Mesenterialarterienast wird mit einem Seidenfaden an das Zwerchfell fixiert. Vgl. Text

Die Operationen wurden möglichst aseptisch durchgeführt. Von 42 operierten Tieren starb eines unter der Operation an irreversiblen Atem- und Herzstillstand. Wir erlebten nur eine Infektion der Hautwunde, die aber durch einfachen Jodanstrich und erneuten Nobecutan-Spray behoben werden konnte. Die übrigen Tiere zeigten keine postoperativen Komplikationen. Die Fäden der Hautnaht wurden von selbst ausgestoßen. Schon nach 2 Wochen war die Hautwunde vernarbt und von Haaren überwachsen. Die Tiere fraßen normal und zeigten keine Störungen von seiten des Intestinaltraktes.

b) Befunde. *1. Versuchsserie.* Wir operierten 31 Tiere, welche 14—50 Tage am Leben blieben. In Abständen von 5 Tagen wurden je 4 Tiere durch Äthernarkose getötet. Wie die Sektion zeigte, blieben die durch die Operation hergestellten Verhältnisse in allen Fällen erhalten (Abb. 14). Die angeschlungenen Mesenterialgefäße waren durch einen bindegewebigen Narbenstrang an das Zwerchfell fixiert und beschrieben meist einen nach oben konvexen Bogen

(Abb. 16a). Oft fanden sich Adhäsionen zwischen Mesenterium und Leber. Wir entnahmen das ganze Darmkonvolut mit dem Zwerchfell und denjenigen Teilen der Leber, welche mit dem Mesenterium verklebt waren und fixierten das Ganze in Formol-Sublimat. Anschließend wurden diejenigen Abschnitte des Mesenteriums, welche unter dem Zug des Zwerchfells gestanden hatten, und der Narbenstrang



Abb. 14. Sektionsbefund eines operierten Versuchstiers 9 Tage nach der Operation. Beachte den Narbenstrang, welcher den Mesenterialarterienast gegen das Zwerchfell fixiert. Linker Rippenbogen nach oben, Darm nach rechts gezogen

histologisch verarbeitet. Wir färbten unsere Schnittserien auszugsweise mit Hämalaun-Eosin, zur Darstellung der elastischen Fasern mit Resorzin-fuchsin-Kernechtrot-Pikroindigo und mit der Goldnerschen Trichromfärbung zur Differenzierung der Muskelfasern. Außerdem verarbeiteten wir Kontrollstücke aus verschiedenen Teilen des freihängenden Mesenterium derselben Versuchstiere und überzeugten uns vom Fehlen jeglicher Arterien mit Längsmuskulatur.

Die Resultate dieser ersten Serie sind in Tabelle 1 zusammengestellt. In 28 von 31 Fällen finden wir in den unter dem Einfluß des Zwerchfellzuges stehenden

Tabelle 1. Übersicht über die Resultate der 1. Versuchsreihe (14—50 Tage)

Tage	Nr.	Längsmuskulatur	Elastische Fasern
14	25	2	2
	26	3	3
	27	2	2
	28	1	2
19	21	0	0
	22	0	0
	23	3	3
	24	2	2
23	6	2	1
25	33	1	2
	34	3	3
	35	1	2
	36	3	3
30	29	1	2
	30	3	2
	31	1	0
	32	2	3
35	13	2	2
	14	3	3
	15	3	2
	16	1	2
40	17	0	0
	18	2	3
	20	0	3
45	9	3	3
	10	1	1
	11	3	3
	12	1	1
50	5	3	2
	7	3	1
	8	3	3

Ausbildung von Längsmuskulatur: (vgl. Abb. 1). 1 = vereinzelt Fasern; 2 = kräftiges einseitiges Bündel; 3 = Längsmuskelhülse.

Vermehrung der elastischen Fasern: 1 = vereinzelt Lamellen; 2 = zwei Membranen; 3 = mehrere Membranen; 0 = Arterien unverändert.

Mesenterialarterien und in ihren Ästen Abschnitte mit typischer innerer Längsmuskulatur und vermehrten elastischen Fasern der Membrana elastica interna (vgl. Abb. 16e). Zwischen längerer (50 Tage) und kürzerer (14 Tage) postoperativer Dauer des Versuches können wir keinen namhaften Unterschied erkennen. Die zu beobachtenden Variationen in bezug auf den Grad der Ausbildung von Längsmuskulatur beruhen offenbar nicht auf zeitlichen Faktoren, sondern sind wohl u. a. auf die Herabsetzung der Zugwirkung durch Adhäsionen des Gefäßstrangs mit der Leber zurückzuführen.

Von den im folgenden ausführlich beschriebenen zwei Fällen, soll der erste veranschaulichen, daß die Längsmuskulatur tatsächlich als Antwort auf die Dehnung des Gefäßes in der Längsrichtung auftritt.

Fall Nr. 23. Einwirkungsdauer 19 Tage. Der Sektionsbefund ist in Abb. 15a wiedergegeben. Der Narbenstrang, der Zwerchfell und Mesenterium miteinander verbindet, ist verhältnismäßig kurz und zieht die Arterienäste A und C nach oben, während der Ast B nach rechts aus dem Zugbereich des Zwerchfells hinausverläuft. Der mikroskopische Befund entspricht durchaus den Erwartungen (Abb. 15b).

Während *B* keine Veränderungen zeigt, kann man erkennen, wie stark die Wand von *C* vom gewöhnlichen Arterienbauplan abweicht. Das Auffälligste ist die Aufsplitterung der Membrana elastica interna (vgl. in *B*) in zahlreiche elastische Faserlamellen, die ein dichtes dreidimensionales Maschenwerk bilden, in welches Längsmuskelfasern eingelagert sind. Diese formen eine eigentliche Hülse um die eingeeengte Lichtung. Neben der auffallend stärkeren Ausbildung der elastischen Längsfasern der Adventitia des Gefäßes *C* im Vergleich mit *B* ist bei genauer Betrachtung auch eine äußere Längsmuskelschicht zu erkennen. In Abb. 15c ist ein Schnitt durch den Ast *C* näher dem Zwerchfell (vgl. Abb. 15a) zu sehen. Von innen nach außen sind 4 Wandschichten zu unterscheiden: 1. eine Ringmuskelschicht, 2. Längsmuskelfasern, 3. nochmals Ringmuskelfasern und 4. eine Schicht von längsgerichteten Elementen, welche sowohl Muskelfasern als auch elastische und kollagene Bindegewebsfasern enthält. Die Lichtung ist stark eingeeengt. Weiter zwerchfellwärts teilt sich die Arterie *C* in verschiedene kleine Äste auf, von welchen die meisten innere Längsmuskelfasern führen.

Der Arterienstamm *A* besitzt ebenfalls stellenweise Längsmuskelfasern, jedoch bedeutend weniger als *C*.

Fall Nr. 13. Sektionsbefund 35 Tage post operationem (Abb. 16a). Ein schmaler, langer Narbenstrang spannt sich vom Zwerchfell gegen das Mesenterium

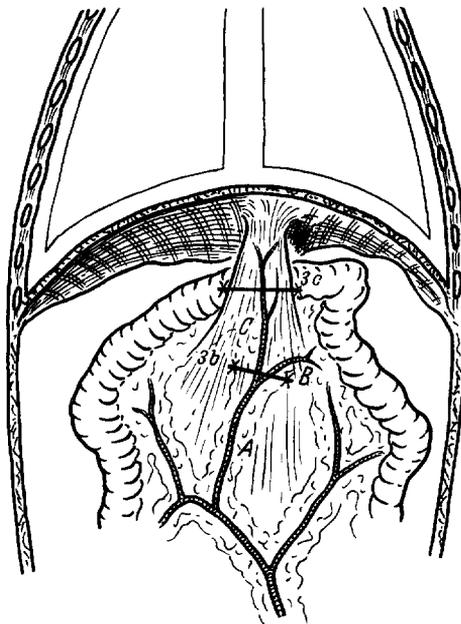


Abb. 15a. Sektionsbefund des Versuchstiers Nr. 23. Ansicht von hinten. *3b* u. *3c* bezeichnen die Lage der Schnitte, welchen die Abb. 15b u. 15c entnommen wurden. Vgl. Text

aus und ist mit der Leberoberfläche verklebt. Er zieht den bei der Operation erfaßten Mesenterialarterienast kranialwärts, so daß dessen proximaler Schenkel (*A*) steil ansteigt und im Bereich des Narbenstrangs in scharfem

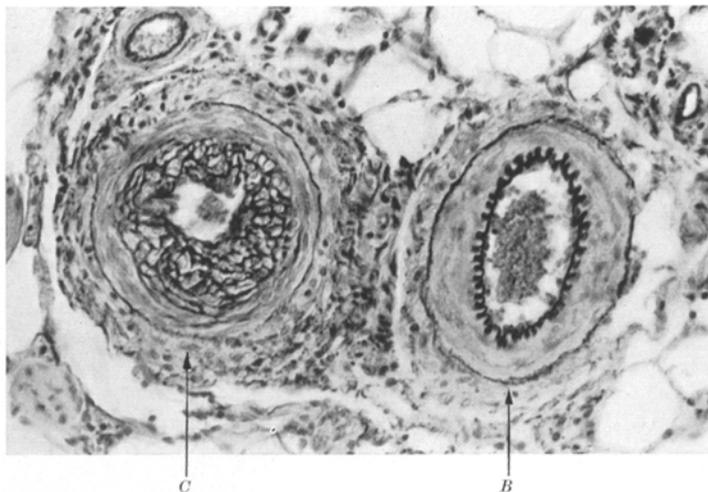


Abb. 15b. Schnitt durch die Mesenterialarterienäste *C* und *B* unmittelbar oberhalb der Verzweigungsstelle (vgl. Abb. 15a). Beachte die kräftige Längsmuskulatur und die Vermehrung der elastischen Fasern in *C*. Gefäß *B* unverändert. Vgl. Text. Elastinfärbung

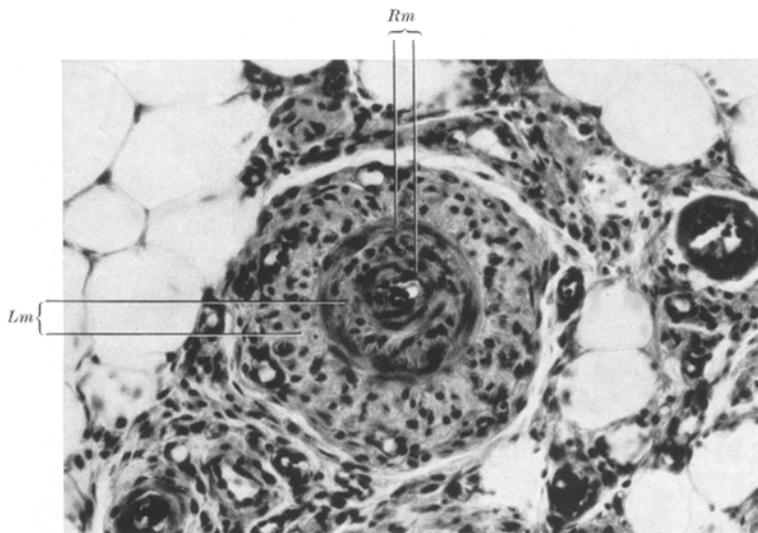


Abb. 15c. Schnitt durch den Mesenterialarterienast *C* im Bereich des Narbenstrangs. Zwei Ring- (*Rm*) und zwei Längsmuskellagen (*Lm*) (vgl. Text). Goldner-Färbung

Bogen gegen den Darm umbiegt (*B*). In Abb. 16b ist ein Schnitt durch den proximalen Schenkel der zwerchfellwärts verlaufenden Arterie zu sehen. Die Membrana elastica interna ist in mehrere elastische Membranen aufgespalten, welche viele Längsmuskelfasern zwischen sich einschließen. Auf einem Schnitt durch die Umbiegungsstelle der Arterie erkennt man deutlich die konzentrische

Längsmuskelhülle, welche die Lichtung allseitig umschließt (Abb. 16c). Gegen den distalen Schenkel *B* verlieren sich die Längsmuskelfasern allmählich; *B* selbst besitzt wieder eine unveränderte Membrana elastica interna.

Besonders demonstrativ sind die Veränderungen der den Narbenstrang in der Längsrichtung durchlaufenden Arterienäste (Abb. 16d und e), welche unter dem direkten, intensiv wirkenden Zwerchfellzug gestanden haben. Sie besitzen ohne Ausnahme eine dünne Tunica media und eine überaus kräftige innere Längsmuskelschicht, welche von reichlich elastischen Membranen durchsetzt ist (Abb. 16e).

Diese beiden Beispiele mitsamt den in Tabelle 1 zusammengefaßten Resultaten unserer Operationen veranschaulichen, daß die rhythmisch in der Längsrichtung ziehende Beanspruchung der Arterien zu einer Veränderung im Wandbau derselben führt: Im Bereich der Tunica interna (vgl. S. 441) kommt es zu einer Aufspaltung der Membrana elastica interna und einer Vermehrung der elastischen Lamellen, welche längliche Zellen zwischen sich fassen. Daß diese als Muskelzellen anzusehen sind, geht aus Abb. 17 hervor. Der Flachschnitt durch die Arterienwand zeigt längsgetroffene Ring- und Längsmuskelfasern mit den typischen länglichen Kernen und den in der Goldner-Färbung besonders schön darstellbaren Myofibrillen.

2. Versuchsserie. Wie Tabelle 1 zeigt, sind schon 14 Tage nach der Operation in der Tunica interna der unter dem Zwerchfellzug stehenden Arterien Längsmuskelfasern und vermehrte elastische Membranen nachweisbar. Wir konnten keinen wesentlichen Unterschied zwischen 14- und 50tägiger postoperativer Versuchsdauer feststellen und haben deshalb eine 2. Versuchsserie mit kürzerer Lebensdauer post operationem durchgeführt, in der Hoffung, Anfangsstadien der Längsmuskelbildung erfassen zu können. Von 6 operierten Tieren töteten wir je 2 nach 3, 6 und 9 Tagen. Die Resultate sind in Tabelle 2 (s. S. 458) zusammengefaßt:

Eine Längsdehnung der Arterien über 3 Tage verursacht noch keine Veränderungen der Gefäßwand. Hingegen zeigen die dem Zwerchfellzug ausgesetzten Mesenterialarterienäste nach 6tägiger Überlebensdauer Veränderungen, welche uns wesentliche Anhaltspunkte für das Verständnis der Längsmuskelbildung vermitteln (Abb. 18—20).

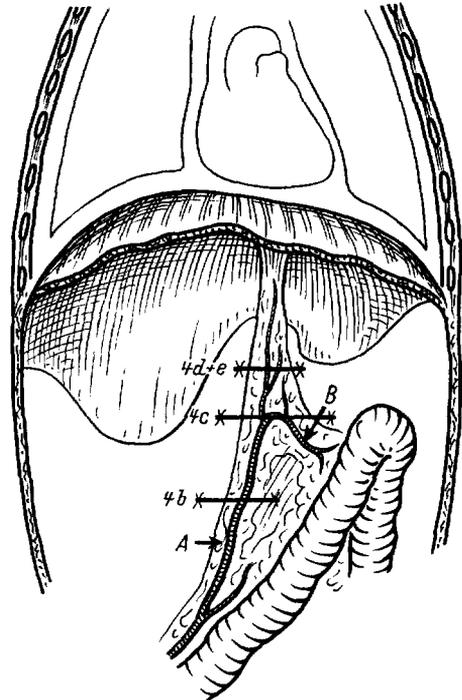
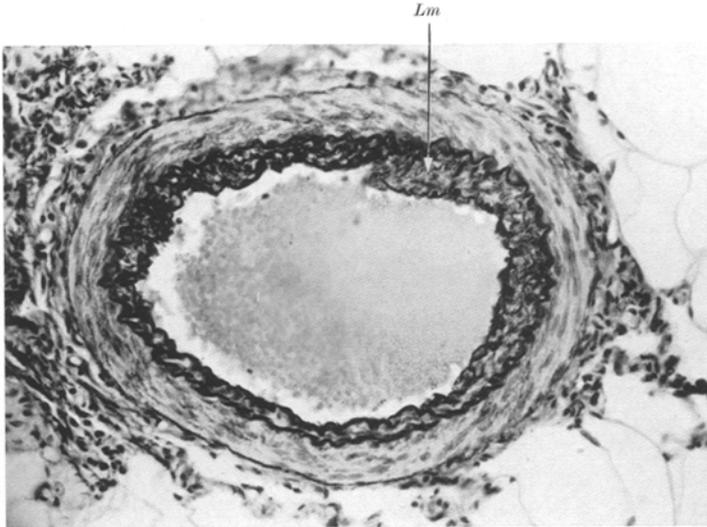
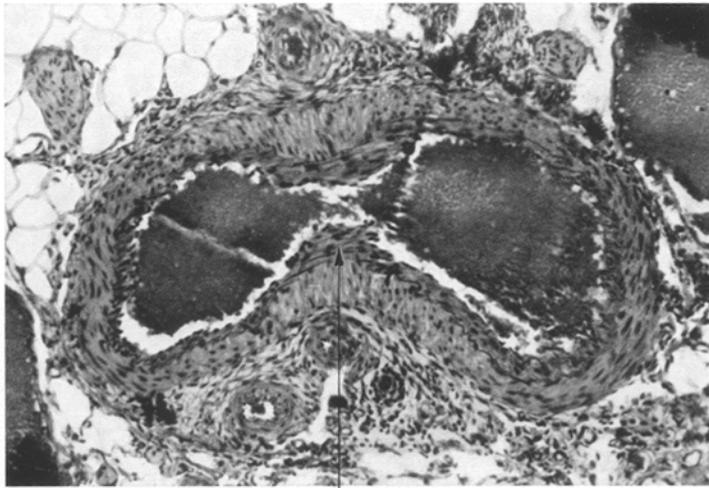


Abb. 16a. Sektionsbefund des Versuchstiers Nr. 13. Ansicht von vorn. *4b—e* bezeichnen die Lage der Schnitte, welchen die Abb. 16b—e entnommen wurden. Vgl. Text

Wie aus Abb. 18a und b ersichtlich ist, hat die Tunica media ihren ursprünglichen Bau verloren. Eine große Zahl von Ringmuskelfasern hat sich abgerundet und war im Moment der Fixation im Begriffe, sich mitotisch zu teilen. Ihre Zell-



b



Lm c

Abb. 16b u. c. b Schnitt durch das Gefäß A. Starke Vermehrung der elastischen Fasern der Membrana elastica interna mit Einlagerung von Längsmuskelfasern (Lm). Elastinfärbung. c Schnitt durch die Umbiegungsstelle der Hauptarterie. Vgl. Abb. 16a. Innere Längsmuskulatur (Lm). Goldner-Färbung

kerne befinden sich in Prophase, Metaphase oder in Rekonstruktion. Gelegentlich trifft man auch Anaphasen (Abb. 18b). In Metaphasen, besonders schön aber in Anaphasen sind eindeutig Chromosomen sichtbar, welche gleichmäßig auf beide Tochterzellen verteilt werden und so zwei vollwertige Tochterkerne aufbauen

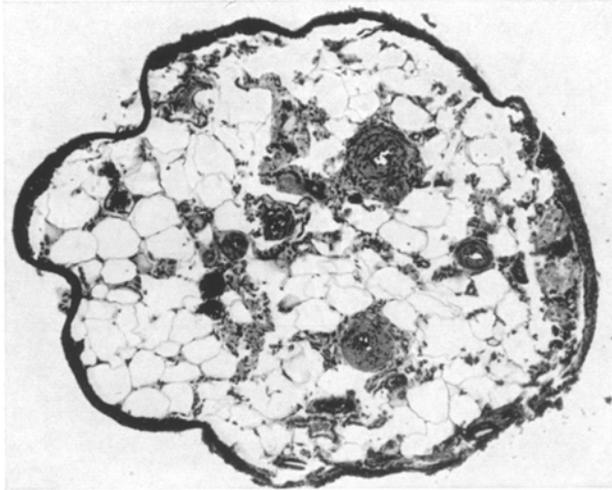
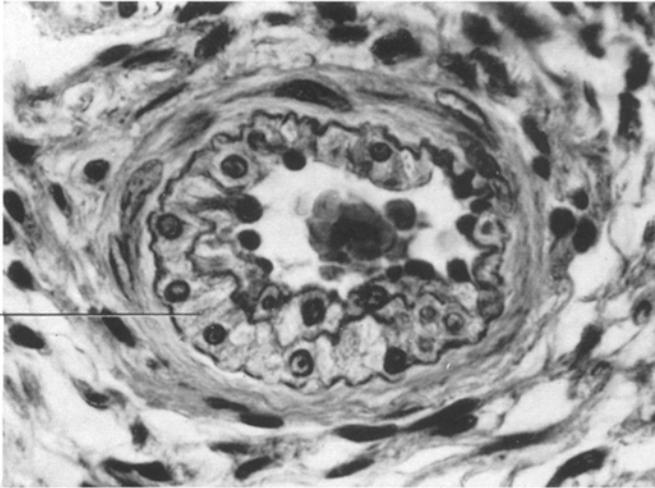
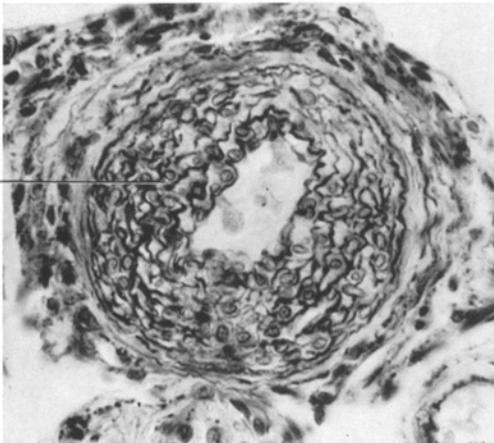


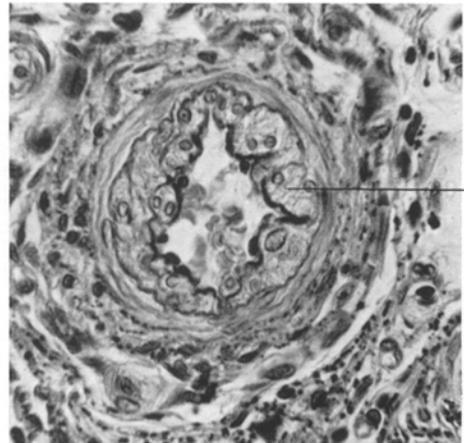
Abb. 16d. Schnitt durch den Narbenstrang. Übersicht. Alle Arterien enthalten kräftige Längsmuskelbündel. Vgl. Abb. 16e. Goldner-Färbung



Lm



Lm



Lm

Abb. 16e. Mesenterialarterienäste aus dem Narbenstrang (Abb. 16d). Kräftige Längsmuskelbündel (*Lm*), dazwischen elastische Lamellen, welche sich von der Membrana elastica interna abgespalten haben. Elastinfärbung

können. Das Zytoplasma der sich teilenden Kerne färbt sich in der Goldner-Färbung intensiv dunkelrot, entspricht also färberisch vollkommen demjenigen gewöhnlicher Muskelzellen. Es sind allerdings keine Myofibrillen zu erkennen;

Tabelle 2. Übersicht über die Resultate der kurzfristigen Versuche (vgl. Tabelle 1)

Tage	Nr.	Tunica media	Längsmuskulatur	Elastische Fasern
3	37	unverändert	0	0
	38	unverändert	0	0
6	39	Mitosen in Muskelzellen und durch Membrana elastica interna wandernde Zellen	1	0
	40		1	1
9	41	unverändert	1	2
	42	unverändert	1	1

hingegen zeigt das Zytoplasma eine feine dunkle Granulierung (Abb. 18 b).

Ein Teil der neugebildeten Zellen scheint die Membrana elastica interna zu durchwandern und in die Tunica interna einzudringen. In Abb. 19 erkennt man die gewellt verlaufende Membrana elastica interna, welche an einer Stelle unterbrochen ist. In dieser Lücke liegt eine Zelle, deren Kern durch die Membran hantelförmig eingeschnürt erscheint. Der eine Teil liegt bereits in der Intima, während sich der Rest noch in der Media

befindet. Abb. 20 zeigt die entsprechende Situation in der Elastinfärbung. Die Membrana elastica interna ist durch eine Zelle unterbrochen, deren Hauptteil mit dem Kern sich bereits in der Tunica interna befindet.

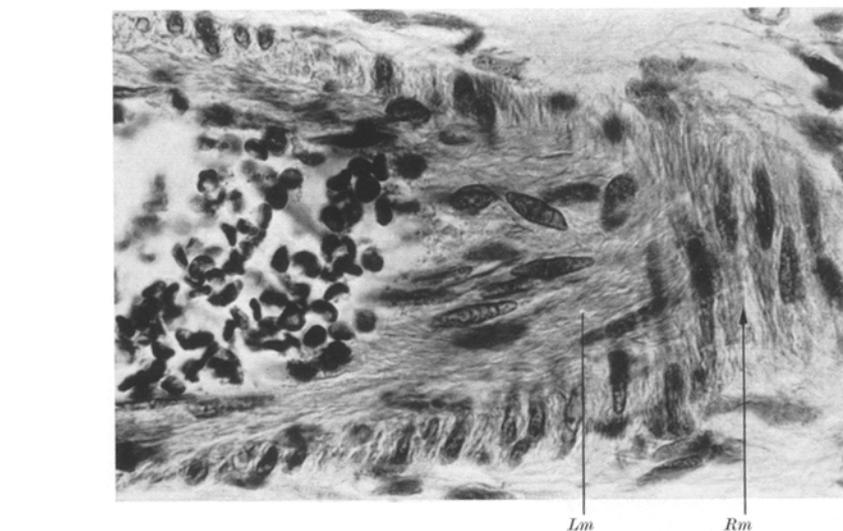


Abb. 17. Schrägschnitt durch die Wand eines Mesenterialarterienastes mit Längsmuskulatur. In den längsgeschnittenen glatten Muskelfasern der Ring- (*Rm*) und der Längsmuskulatur (*Lm*) sind Myofibrillen zu erkennen. Goldner-Färbung

Solche quer zur Membrana elastica interna liegende Zellen können wir nur in Arterien finden, welche 6—9 Tage dem Zwerchfellzug ausgesetzt waren. Diese Gefäße enthalten meistens einige innere Längsmuskelfasern, welche aber noch nicht von elastischen Membranen umschlossen sind.

Mesenterialarterienäste, welche 9 Tage dem Zwerchfellzug ausgesetzt waren, zeigen innere Längsmuskelfasern, gelegentlich auch durchwandernde Zellen, hingegen lassen sich keine Mitosen finden.

c) Diskussion. Nachdem wir S. 447 festgestellt hatten, daß die Bronchialarterienäste ihre charakteristische Längsmuskulatur erst sekundär im 2. Lebensjahrzehnt erhalten, begannen wir an der heute gültigen Ansicht, es handle sich bei diesen Ästen um „Sperrarterien“, zu zweifeln und stellten die Frage: Kann eine Arterie im Tierexperiment auf eine andauernde zu- und abnehmende Dehnung des Gefäßes in der Längsrichtung mit der Ausbildung von Längsmuskulatur antworten?

Zur Lösung dieser Frage haben wir bei Ratten operativ Mesenterialarterienäste mit dem Zwerchfell verbunden, so daß diese durch die respiratorische Zwerchfellverschiebung unter rhythmisch zu- und abnehmenden Zug zu stehen kamen. Von 31 operierten Tieren unserer 1. Versuchsserie zeigten 28 (90%) Veränderungen an der Wand dieser Gefäße in Form einer Einlagerung von Längsmuskelfasern in die Tunica interna und einer Vermehrung der elastischen Fasern. Wie die Untersuchung von Kontrollpräparaten zeigte, lassen sich in unbeeinflussten Mesenterialarterienästen keine ähnlichen Bildungen nachweisen. Im Fall Nr. 23 (vgl. S. 453) kam von zwei gleich großen Ästen desselben Stammgefäßes der eine unter den Zwerchfellzug zu stehen und zeigt kräftige Längsmuskelbündel, während der andere Ast unbeeinflusst blieb und sich dementsprechend in seinem Wandbau von einer gewöhnlichen Arterie nicht unterscheidet. Unser Experiment, im besonderen das letztgenannte

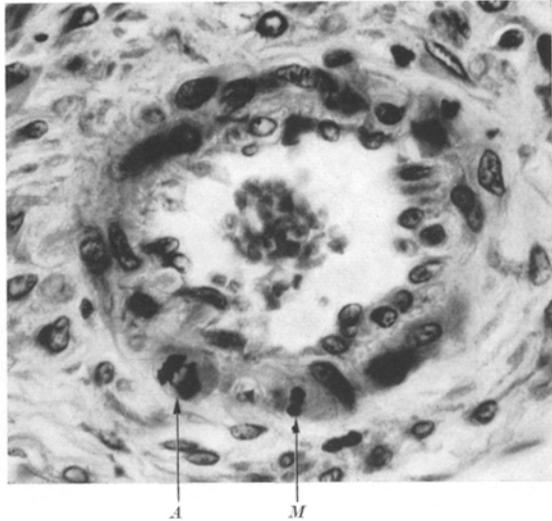


Abb. 18a. Unter der Wirkung des Längszuges vermehren sich Ringmuskelfasern der Tunica media mitotisch. Man erkennt eine Anaphase (A) und eine Metaphase (M). Goldner-Färbung

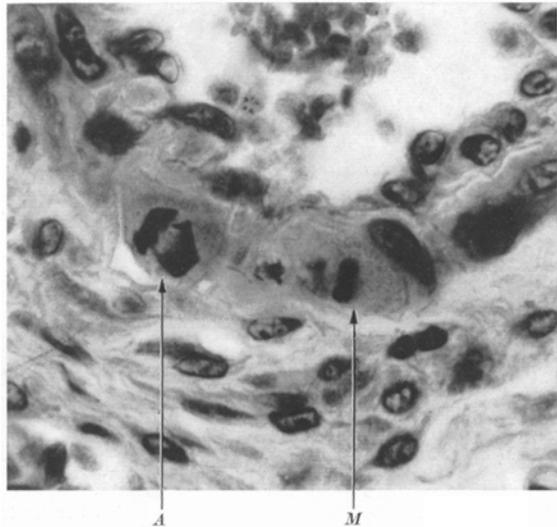


Abb. 18b. Dasselbe wie Abb. 18a bei stärkerer Vergrößerung

Beispiel, hat unsere Frage somit im positiven Sinn beantwortet, und wir können daraus schließen, daß eine andauernde, rythmisch zu- und abnehmende Dehnung einer Arterie in der Längsrichtung den formativen Reiz für die Bildung von

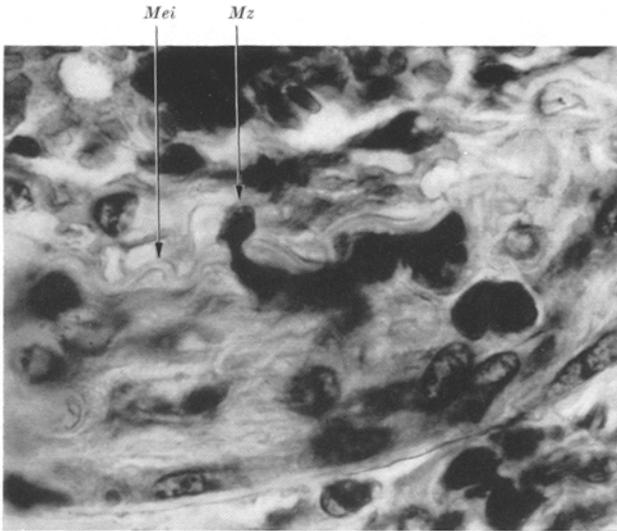


Abb. 19. Eine Muskelzelle (*Mz*) dringt unter Durchwanderung der Membrana elastica interna (*Mei*) aus der Tunica media in die Tunica interna, in welcher bereits einzelne Längsmuskelfasern zu erkennen sind. Goldner-Färbung

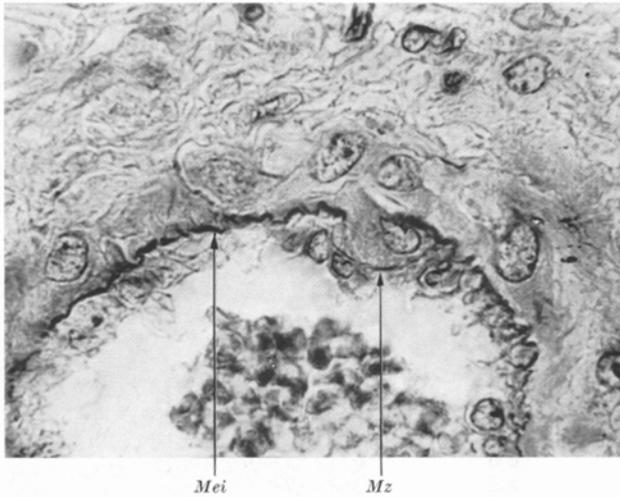


Abb. 20. Wie Abb. 19. Der Kern befindet sich bereits in der Tunica interna. Elastinfärbung

Längsmuskelfasern in der Tunica interna darstellen kann.

Gleichzeitig mit der Ausbildung von Längsmuskelfasern in der Tunica interna kommt es auch zu einer Vermehrung der elastischen Fasern, was ohne weiteres verständlich ist, wenn man berücksichtigt, daß die Membrana elastica interna schon normalerweise aus dicht gelagerten elastischen Längsfasern aufgebaut ist, welche für die Elastizität der Arterie in der Längsrichtung verantwortlich sind. In unserem Experiment stellt somit die Vermehrung der elastischen Längsfasern der Arterien eine einfache Hypertrophie des elastischen Gewebes als Folge einer vermehrten Beanspruchung dar.

Mit den Längsmuskelfasern tritt hingegen eine Komponente auf, welche normalerweise nicht angelegt ist. Da ihr Auftreten und die Hypertrophie des elastischen Gewebes die Antwort auf dieselbe Ursache darstellen und da

die Längsmuskelfasern sehr enge Beziehungen zu den neugebildeten elastischen Fasern aufweisen, liegt der Schluß nahe, es handle sich dabei ebenfalls um eine Einrichtung zum Schutz der Arterie vor übermäßiger schädlicher Längsdehnung.

In unserem Experiment war der dehnende Zug nicht konstant, sondern er nahm im Expirium zu und im Inspirium ab, wechselte also rhythmisch mit der

Atemfrequenz. Es ist deshalb die Frage zu erwägen, ob den Längsmuskelfasern die Aufgabe zukommt, für die Anpassung der Arterie an verschiedene Längsdehnungszustände zu sorgen. Da wäre aber gleichzeitig eine weitere Frage zu erheben, welche unser Experiment vorläufig nicht beantworten kann: Bilden sich Längsmuskelfasern nur unter (rhythmisch) wechselnder Längsdehnung oder genügt dazu auch ein andauernder konstanter Zug? Zur Lösung dieser Frage werden wir spezielle Versuche durchführen müssen.

Wie lange muß der Reiz anhalten, und wie stark muß er sein, bis Längsmuskelfasern in der Arterienwand auftreten? In den Bronchialarterien sind solche erst von der späteren Kindheit an, in unserem Material mit Beginn im 11. Lebensjahr, nachzuweisen, obwohl die respiratorische Dehnung der Bronchen und damit der Bronchialarterienäste schon mit der Geburt beginnt. Die Vasa vasorum der Aorta ascendens zeigen ebenfalls erst in der späteren Jugend die ersten Einlagerungen von Längsmuskelfasern (LAURENT 1944). In unserem Versuch braucht es überraschenderweise nur 6 Tage, um die Längsmuskelbündel erscheinen zu lassen. Diese große Differenz erklärt sich wohl aus der verschiedenen Reizintensität. Darauf deutet auch ein Befund von FEYRTER (1927) hin, der in den Bronchialarterien eines 2jährigen Mädchens, das an Keuchhusten ad exitum kam, Längsmuskelfasern fand. Dieses verfrühte Auftreten ist wohl als Folge der erhöhten Atmungsintensität bei der Dyspnoe anzusehen.

Die Lösung der Frage nach der Herkunft der Längsmuskelfasern liegt in unseren kurzfristigen Versuchen (6 Tage) (vgl. S. 455). Die zahlreichen Mitosen in den Ringmuskelfasern der Tunica media (Abb. 18), verbunden mit dem Vorkommen von quer zur Membrana elastica interna liegenden Muskelzellen (Abb. 19 und 20), weisen darauf hin, daß ein Teil der mitotisch vermehrten Mediaringsmuskelzellen unter Durchwanderung der Membrana elastica interna in die Tunica interna gelangen, um sich dort in die Längsrichtung der Arterie einzustellen.

d) Folgerung. Wir können also die dieser Untersuchung zugrunde liegende Frage folgendermaßen beantworten: *Wird eine Arterie im Tierexperiment einer andauernden rhythmisch zu- und abnehmenden Dehnung in der Längsrichtung ausgesetzt, so bildet sie typische innere Längsmuskulatur aus und vermehrt die elastischen Fasern der Membrana elastica interna.* Die Längsmuskelfasern stammen von der Tunica media ab, deren Ringmuskelfasern sich mitotisch teilen und unter Durchwanderung der Membrana elastica interna in die Tunica interna gelangen, wo sie sich in die Längsrichtung einstellen.

III. Abhängigkeit des Vorkommens von Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis von der respiratorischen Dehnungsintensität der Bronchuswand

a) Fragestellung. In Beantwortung unserer ersten Frage (vgl. S. 444) stellten wir fest, daß die für die Äste der A. bronchialis charakteristische innere Längsmuskulatur erst sekundär im 2. Lebensjahrzehnt auftritt. Die Antwort auf unsere 2. Frage (vgl. S. 450) lautet wie folgt:

Wird eine Arterie im Tierexperiment einer andauernden rhythmisch zu- und abnehmenden Dehnung in der Längsrichtung ausgesetzt, so bildet sie typische innere Längsmuskulatur aus und vermehrt die elastischen Fasern der Membrana elastica interna. Der Bau dieser experimentell veränderten Gefäße entspricht

genau demjenigen der Bronchialarterienäste mit innerer Längsmuskulatur (vgl. S. 441, Abb. 1—5).

Da die Äste der A. bronchialis die Bronchen geflechtartig umfassen, können sie bei der respiratorischen Größenveränderung der Bronchen gedehnt werden, weshalb wir für die folgende Untersuchung die Frage stellen: Ist das Vorkommen von Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis abhängig vom Intensitätsgrad der respiratorischen Dehnung der Bronchuswand?

b) Material und Methode. Um die Verbreitung der Bronchialarterien mit Längsmuskulatur in der Lunge und ihre Beziehung zu bestimmten Abschnitten des Bronchialbaums (vgl. S. 444) bestimmen zu können, verarbeiteten wir die ganze rechte Lunge eines 18jährigen Mannes, der an den Folgen eines Unfalls gestorben war und anamnestisch keine Lungenkrankheiten aufwies. Die 3 Lappen wurden nach einem bestimmten Aufteilungsplan in Streifen aufgeteilt, welche in Blöcke von 2 cm Höhe zerschnitten wurden. Von der apikalen Fläche dieser 120 Blöcke wurden Schnittserien zu etwa 100 Schnitten à 10 μ Dicke hergestellt, welche mit Hämalaun-Eosin, Resorzinfuchsin-Kernechtrot-Pikroindigo und mit der Trichromfärbung nach GOLDNER gefärbt wurden. Auf diese Weise erfaßten wir etwa 5% des gesamten Lungenvolumens.

c) Befunde. STUTZ (1949) stellte von der rechten Lunge normaler Versuchspersonen Bronchogramme in tiefem Expirium und tiefem Inspirium her und untersuchte daran die respiratorische Größenveränderung der Bronchen vom Hauptbronchus bis zu kleinen Bronchen von 2 mm Durchmesser. Aus seinen Messungen errechnete er für jeden Bronchus zwei Faktoren: Die Quotienten der Dehnung der Bronchialwand (D) und der Verlängerung des Bronchus (L) bei der Atmung. Im wesentlichen ergab sich, daß große zentrale Bronchen eine geringe, kleinere periphere Bronchen eine stärkere Veränderung erfahren. Die Bronchen des Unter- und Mittellappens werden zudem von den Atmungsbewegungen stärker betroffen als diejenigen des Oberlappens. Wir berechneten für Ober- und Unterlappen die Quotientendurchschnittswerte. Diese betragen für die Bronchusdehnung (D) im Oberlappen 1,25, im Unterlappen 1,41, für die Verlängerung (L) 1,16 im Oberlappen bzw. 1,22 im Unterlappen (Abb. 21).

In Abb. 21 entstammt die Zeichnung des Bronchialbaums einem Bronchogramm von STUTZ. Mittels Schraffen wurden die Quotienten der respiratorischen Dehnung (Durchmesservergrößerung) in die betreffenden Bronchen eingetragen. Diese nehmen vom Zentrum gegen die Peripherie zu, was aus der Schraffendichte deutlich zu ersehen ist. Eine Reihe von kleinen Bronchen verdoppelt ihren Durchmesser bei der Inspiration geradezu.

Wir suchten sämtliche 120 Schnittserien der vollständig histologisch verarbeiteten rechten Lunge des 18jährigen Mannes (s. o.) nach Bronchialarterien-ästen mit innerer Längsmuskulatur ab, und trugen dieselben in den Aufteilungsplan dieser Lunge ein. Auf diese Weise gelang es uns, die gefundenen Äste mit Längsmuskulatur an richtiger Stelle in das Bronchogramm von STUTZ einzuzeichnen. Der Ausbildungsgrad der inneren Längsmuskulatur ist mittels der kleinen runden Symbole angegeben (vgl. Abb. 1), wobei wir zwecks besserer Übersicht auf die Eintragung der Bronchialarterien ohne Längsmuskulatur verzichteten. Bei der Beurteilung muß aber berücksichtigt werden, daß Bronchogramm und Arterienbefund von zwei verschiedenen Individuen stammen und deshalb nur regionenweise verglichen werden können.

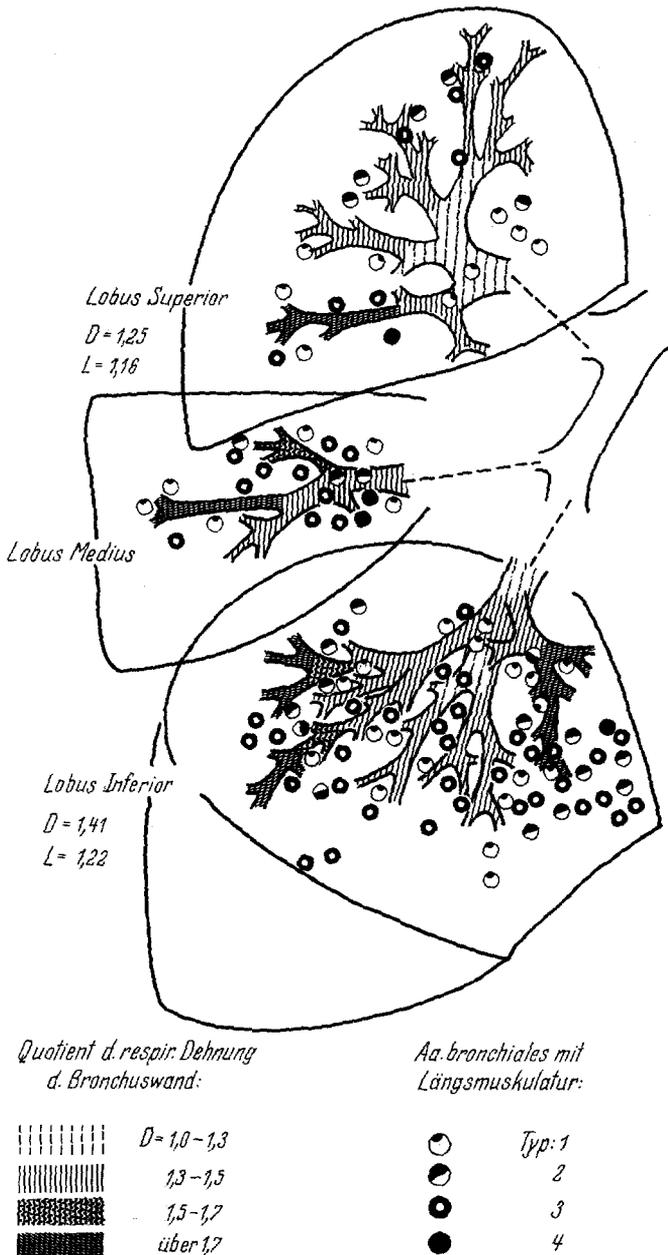


Abb. 21. Beziehung zwischen Intensität der respiratorischen Dehnung der Bronchialwand (Schraffen) und Häufigkeit der Bronchialarterienäste mit Längsmuskulatur. Vgl. Text und Abb. 1

Schon auf den ersten Blick fällt auf, daß die Arterienäste mit Längsmuskulatur im Unterlappen viel dichter liegen als im Oberlappen. Während im Bereich kleiner Bronchen des Unterlappens praktisch alle Bronchialarterienäste Längsmuskulatur enthalten, findet man an entsprechender Stelle im Oberlappen noch sehr viele

unveränderte Äste. Der Vergleich dieses Befundes mit den Quotientendurchschnittswerten zeigt, daß einer stärkeren respiratorischen Dehnung der Bronchen im Unterlappen ($D = 1,41$ gegenüber $1,25$ im Oberlappen) eine stärkere Ausbildung von Längsmuskulatur in den Bronchialarterien entspricht.

Bei genauer Betrachtung erkennt man, daß in Begleitung von Bronchen mit einem respiratorischen Dehnungsquotienten unter $1,3$ nur wenige Arterien spärlich Längsmuskulatur ausbilden (1. Ausbildungsgrad, Abb. 1), während bei Dehnungsquotienten über $1,3$ die Mehrzahl der Bronchialarterienäste viel Längsmuskulatur aufweist (2.—4. Ausbildungsgrad). In Regionen mit höchsten Quotienten finden wir sozusagen in allen Arterienästen kräftige Längsmuskelbündel.

d) Diskussion. Die dieser Untersuchung zugrunde liegende Frage lautet: Ist das Vorkommen von Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis abhängig vom Intensitätsgrad der respiratorischen Dehnung der Bronchuswand? Wir versuchten diese Aufgabe zu lösen, indem wir die Verteilung der Bronchialarterienäste mit innerer Längsmuskulatur in der Lunge eines gesunden, an den Folgen eines Unfalls verstorbenen 18jährigen Mannes mit den aus Bronchogrammen ermittelten Quotienten der respiratorischen Bronchusdehnung verglichen.

Wie aus den vorliegenden Befunden hervorgeht, nimmt die Zahl der Bronchialarterien mit Längsmuskulatur mit der Intensität der respiratorischen Dehnung der Bronchuswand zu. Dehnungsquotienten unter $1,3$ scheinen geringen modifizierenden Einfluß auf die Arterienwand zu haben; bis zu diesem Grade wird wohl der geschlängelte Verlauf der Bronchialarterien deren Anpassung an die wechselnde Ausdehnung der Bronchuswand gewährleisten. Eine stärkere Dehnung des Bronchus hat aber unweigerlich eine andauernde zu- und abnehmende Dehnung der Arterie in der Längsrichtung zur Folge, welche als formativer Reiz die Bildung von Längsmuskelfasern verursachen kann.

Dieses Verhalten entspricht durchaus dem Resultat unserer tierexperimentellen Untersuchungen (s. S. 461), welche zeigten, daß Mesenterialarterienäste als Antwort auf einen dauernden rhythmisch zu- und abnehmenden Längszug mit der Ausbildung von Längsmuskulatur antworten.

Die Intensität der Bronchuswanddehnung scheint auch Einfluß auf den Ausbildungsgrad der Längsmuskulatur zu haben (vgl. Oberlappen in Abb. 21). Die von STUTZ (1949) bestimmten Zahlenwerte bezeichnen allerdings die Unterschiede zwischen den Extremstellungen der Lunge (tiefes Inspirium — tiefes Expirium) und können deshalb nur zu Vergleichszwecken verwendet werden. Die Bronchuswand, und damit die Arterien, unterliegen bei gewöhnlicher Atmung weniger intensiven Dehnungen, weshalb wohl schon geringere Beanspruchungen der Arterienwand in der Längsrichtung als formativer Reiz für die Ausbildung von Längsmuskelfasern genügen müssen.

Außer in der Wand der Bronchen finden sich in der Pleura pulmonalis Arterien mit sehr kräftiger innerer Längsmuskulatur. Da die Pleura bei der Atmung ja stark gedehnt wird, ist dies auch ohne weiteres verständlich. Die Verteilung dieser Arterien zeigt keine Besonderheiten, weshalb sie nicht in die Abb. 21 eingetragen wurde.

IV. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Arterien mit innerer Längsmuskulatur faßt man heute allgemein als „Drossel- oder Sperrarterien“ auf, welchen die Aufgabe einer lokalen Kreislaufregulation

— besonders in Beziehung zu arteriovenösen Anastomosen — zugeschrieben wird (v. SCHUMACHER 1915, CLARA 1927, WATZKA 1936, MATHIS und EGLITIS 1937, HIRSCH 1949—1957 u. a.). Das innere Längsmuskelbündel soll bei der Kontraktion durch Verdickung die einengende Wirkung der Mediaringmuskulatur bis zum vollständigen Verschuß der Gefäßlichtung ergänzen.

Solche Arterien mit innerer Längsmuskulatur konnten in vielen Organen nachgewiesen werden, so im Myokard (BUCHER 1944, CONTI 1945, HIRSCH 1949 bis 1957, HIERONYMI 1956 u. a.), in den Vasa vasorum der Aorta ascendens (NEUMANN 1939, KOECHER 1941, LAURENT 1944), in wachsenden Schilddrüsenadenomen (RATZENHOFER 1953), im Magen (BOESSNECK 1956 u. a.), im Oesophagus (CONTI und PASARELLI 1951) im Penis (CONTI 1950) usw. Es war aber besonders der Nachweis solcher Arterien mit innerer Längsmuskulatur in der menschlichen Lunge durch v. HAYEK (1940), der den „Sperrarterien“ große Aktualität verlieh. Wegen ihrer Beziehungen zu den Blutgefäßanastomosen in der Lunge (v. HAYEK 1940, MERKEL 1941, VERLOOP 1948, LAPP 1951, PRETO PARVIS 1954 u. a. m.) mißt man ihnen große Bedeutung für verschiedene Kreislaufprobleme der Lunge zu, welche vor allem Pathologen interessieren. So schreibt unter anderem KOENN (1956) bereits „Über die Erkrankung der Sperrarterien“.

Wie wir in eigenen Untersuchungen (TOENDURY und WEIBEL 1956) feststellten, kommen aber in der Lunge solche „Sperrarterien“ nicht nur in Beziehung zu den erwähnten Anastomosen vor, sondern es kann jeder beliebige Ast der A. bronchialis über eine lange Strecke Längsmuskelfasern enthalten, ohne irgendeine Anastomose mit einem andern Blutgefäß zu bilden. Auf Grund dieser von den heute gültigen Angaben abweichenden Beobachtung schien es uns angezeigt, die Frage der Arterien mit innerer Längsmuskulatur erneut anzugehen. So liegt unserer 1. Untersuchung (s. S. 444) die Frage zugrunde: Wann treten die Längsmuskelfasern in den Bronchialarterien von Lungen normaler Individuen erstmals auf und welche Veränderungen erfahren sie im Laufe des Lebens?

Wie die Untersuchung einer Reihe normaler Lungen von Feten, Neugeborenen, Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen bis zum 50. Altersjahr zeigt, treten die Längsmuskelfasern in den Ästen der A. bronchialis erst im Laufe des 2. Lebensjahrzehnts auf. Diese späte Entstehung läßt uns an der primären kreislaufregulierenden Funktion der Längsmuskelpolster zweifeln, da es uns nicht klar ist, weshalb diese erst zu einem Zeitpunkt angelegt werden sollen, da keine Veränderungen der Kreislaufverhältnisse in der Lunge vorgenommen werden.

Auf der Suche nach einer andern Bedeutung der Längsmuskulatur fällt uns auf, daß solche Arterien mit innerer Längsmuskulatur in Organen auftreten, deren Größe und Ausdehnung stark wechseln, wodurch die Gefäße häufig gedehnt werden (s. S. 449). Außerdem stehen die Längsmuskelfasern in enger Beziehung zu den vermehrten elastischen Längsfasern der Membrana elastica interna, welche vornehmlich der Längselastizität der Arterie dienen.

So gelangten wir zur Arbeitshypothese, daß die Längsmuskulatur in der Wand der Bronchialarterien eine Folge der übermäßigen Beanspruchung derselben in der Längsrichtung darstelle. Dies soll durch die Lösung folgender zwei Fragen geprüft werden:

1. Kann eine Arterie im Tierexperiment auf eine andauernde, rhythmisch zu- und abnehmende Dehnung in der Längsrichtung mit der Ausbildung von Längsmuskulatur antworten?

2. Ist das Vorkommen von Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis abhängig vom Intensitätsgrad der respiratorischen Dehnung der Bronchuswand?

Die Antwort auf die 1. Frage wird in unserer 2. Untersuchung gegeben (s. S. 450). Bei Ratten wurden operativ Mesenterialarterienäste an das Zwerchfell fixiert und kamen so unter den zu- und abnehmenden Zug der respiratorischen Zwerchfellbewegung zu stehen. In diesen Ästen findet man schon nach kurzer Zeit typische innere Längsmuskulatur, welche — wie in den Bronchialarterien — enge Beziehungen zu den vermehrten elastischen Fasern der Membrana elastica interna aufweist. Die Längsmuskelfasern stammen von den Ringmuskelfasern der Tunica media ab, welche sich mitotisch teilen und unter Durchwanderung der Membrana elastica interna in der Tunica interna gelangen, wo sie sich in die Längsrichtung einstellen. Im Tierexperiment antwortet also eine Arterie auf andauernde zu- und abnehmende Dehnung in der Längsrichtung mit der Ausbildung von Längsmuskulatur.

Wie unsere 3. Untersuchung (s. S. 461) in Beantwortung der 2. Frage zeigt, geschieht in den Bronchialarterien offenbar dasselbe, denn wir finden eine sehr signifikante Abhängigkeit des Vorkommens von Ästen mit innerer Längsmuskulatur vom Intensitätsgrad der respiratorischen Dehnung der Bronchialwand: Im Bereich von Bronchen mit respiratorischen Dehnungsquotienten unter 1,3 fehlen den Ästen der A. bronchialis Längsmuskelfasern, während in Begleitung von Bronchen mit höheren Dehnungsquotienten (bis 2,0) viele, ja sogar alle Bronchialarterienäste kräftige Längsmuskelbündel enthalten.

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen erlauben uns zu entscheiden, ob die Längsmuskulatur in den Bronchialarterien der Blutstromdrosselung zu dienen hat (ob diese Gefäße also „Sperrarterien“ sind) oder ob sie als Folge einer übermäßigen Dehnung der Arterien sekundär ausgebildet wird. Wir kommen zum Schluß, daß die Äste der A. bronchialis auf die andauernde rhythmisch zu- und abnehmende Beanspruchung in der Längsrichtung infolge der respiratorischen Dehnung der Bronchialwand mit der Ausbildung von Längsmuskulatur antworten. Dieser Vorgang konnte im Tierexperiment reproduziert werden.

Da die Längsmuskulatur also nicht von einem kreislauftechnischen Standpunkt aus angelegt wird, kann ihre Bedeutung nicht primär in einem kreislaufregulatorischen Verschlusmechanismus liegen, sondern dient offenbar dem Schutz der Arterie vor Überdehnung und befähigt sie der Anpassung an verschiedene Dehnungszustände. Als Nebenwirkung können die unterschiedlich entwickelten Längsmuskelbündel selbstverständlich auch zur Gefäßverengung beitragen, wobei der Effekt in den meisten Fällen aber nicht unbedingt den Bedürfnissen des Organismus entsprechen muß. Die verschiedenartigen Bilder, denen wir in ein- und derselben Lunge, ja sogar am selben Gefäßast begegnen, sind nicht Ausdruck eines bestimmten Funktionszustandes (Kontraktion oder Dilatation), sondern rühren von verschieden starker Ausbildung der Längsmuskulatur her. Diese kann so weit gehen, daß die Gefäßlichtung vollständig eingengt wird und verödet. In solchen Fällen hat die als „physiologisch“ zu betrachtende Anpassung an eine gesteigerte, im ursprünglichen Arterienbauplan zu wenig berücksichtigte Längsbeanspruchung Folgen gezeitigt, die bereits als „pathologisch“ zu bewerten sind.

Wir wollen in diesem Zusammenhang nicht behaupten, es gebe überhaupt keine „Sperrarterien“ in unserem Körper. Die Verhältnisse müssen von Fall zu Fall abgeklärt werden. Dabei müssen besonders die Beziehungen zu den elastischen Fasern, die Verteilung im Organ und der Zeitpunkt des Auftretens berücksichtigt werden. Die beschriebenen Längsmuskelfasern dürfen auch nicht mit den sog. epitheloiden Zellen der Intima bestimmter Gefäße (Nieren, Glomus coccygeum usw.) verwechselt werden, wie dies oft geschieht. Diese sind nicht langgezogen, sondern rund, ihr Zytoplasma ist hell und enthält keine Myofibrillen. Zwischen den Zellen liegen keine elastischen Fasern. Die Membrana elastica interna fehlt diesen Gefäßen überhaupt, worauf CLARA (1927) bereits hingewiesen hat. Über die Aufgabe dieser epitheloiden Zellen sind wir vorläufig noch wenig unterrichtet. Verschiedene Untersucher schreiben ihnen inkretorische Funktion zu, doch beruhen diese Aussagen mehr auf Vermutungen und Analogieschlüssen.

Abschließend möchten wir fordern, künftig den Begriff „Sperrarterie“ nur mit Bedacht zu verwenden und ihn für die menschliche Lunge ganz fallen zu lassen. In der menschlichen Lunge gibt es keine „Sperrarterien“, sondern nur „Arterien mit innerer Längsmuskulatur“.

Zusammenfassung

1. Die Frage der Bronchialarterienäste mit innerer Längsmuskulatur, welche heute allgemein als „Sperrarterien“ bezeichnet werden, wird erneut von verschiedenen Gesichtspunkten aus untersucht.

2. Es wird festgestellt, daß die Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis von Lungen normaler Individuen erst sekundär im Laufe des 2. Lebensjahrzehnts ausgebildet wird. Die Aufgabe dieser Längsmuskulatur kann demnach nicht in einem kreislaufregulierenden Verschlusmechanismus liegen. Zur Stützung der Hypothese, die Längsmuskulatur entstehe als Folge übermäßiger Dehnung der Arterie in der Längsrichtung, werden die zwei folgenden Untersuchungen durchgeführt.

3. Im Tierexperiment werden Mesenterialarterienäste operativ der rhythmisch zu- und abnehmenden Dehnung durch die respiratorische Zwerchfellbewegung ausgesetzt; diese bilden in der Tunica interna typische Längsmuskulatur aus. Die Längsmuskelfasern stammen von den Ringmuskelfasern der Tunica media ab, welche sich mitotisch vermehren.

4. Die Ausbildung von Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis ist direkt abhängig von der respiratorischen Dehnungsintensität der Bronchuswand, und somit Folge der Längsdehnung der Arterien.

5. Damit wird der Begriff „Sperrarterie“ in Frage gestellt. Für die Arterien mit Längsmuskulatur in der menschlichen Lunge muß er nach unserer Auffassung aufgegeben werden.

Literatur

- BOESSNECK, J.: Polstergefäße im Psaltersegel des Schafes. Z. Zellforsch. **45**, 31—38 (1956). — BUCHER, O.: Polsterbildungen in Arterien des Myokardes. Schweiz. med. Wschr. **1944**, 522—523. — CLARA, M.: Die arteriovenösen Anastomosen der Vögel und Säugetiere. Ergebn. Anat. Entwickl.-Gesch. **27**, 246—295 (1927). — CONTI, G.: Arterie di blocco ed anastomosi arteriovenose nel cuore dell'uomo. Atti Soc. med.-chir. Padova **23**, 289—304 (1945). — Contributo alla conoscenza dei dispositivi regolatori del flusso sanguigno lungo i vasi arteriosi e venosi del pene dell'uomo. Boll. Soc. ital. Biol. sper. **26**, 909—911 (1950). —

CONTI, G., e L. PASARELLI: Contributo alla conoscenza dell'esofago umano. Arch. Chir. Torace 8, 269—286 (1951). — FEYRTER, F.: Über die pathologische Anatomie der Lungenveränderungen beim Keuchhusten. Frankfurt. Z. Path. 35, 213—255 (1927). — HAYEK, H. v.: Über einen Kurzschlußkreislauf. Z. Anat. Entwickl.-Gesch. 110, 412—422 (1940). — HERONYMI, G.: Über den altersbedingten Formwandel elastischer und muskulärer Arterien. S.-B. Heidelbg. Akad. Wiss., math.-nat. Kl., 3. Abh. 1956. — HIRSCH, S.: Grundsätzliches zur Frage der Regulationseinrichtungen im Coronarkreislauf. Acta anat. (Basel) 8, 168 bis 184 (1949). — Die letzten Millimeter der arteriellen Strombahn. Ciba-Symposium 5, 46—52 (1957). — KOECHER, P. H.: Die arterielle Versorgung der Cardiaorta. Z. mikr.-anat. Forsch. 50, 273—298 (1941). — KOENN, G.: Über die Erkrankung der Sperrarterien und der arteriovenösen Anastomosen der Lunge. Beitr. path. Anat. 115, 295—312 (1955). Die pathologische Morphologie der Lungengefäße bei chronischem Cor pulmonale. Beitr. path. Anat. 116, 273—329 (1956). — LAPP, H.: Über die Sperrarterien der Lunge und die Anastomosen zwischen A. bronchialis und A. pulmonalis, über ihre Bedeutung insbesondere für die Entstehung des haemorrhagischen Infarktes. Frankfurt. Z. Path. 62, 537—550 (1951). — LAURENT, A.: Anatomie und Pathologie der A. cardioortalis. Cardiologica (Basel) 8, 348—392 (1944). — MAERK, W.: Über arteriovenöse Anastomosen, Gefäßsperrern und Gefäße mit epitheloiden Zellen beim Menschen. Z. mikr.-anat. Forsch. 50, 392—445 (1949). — MATHIS, J., u. J. EGLITIS: Über besondere Einrichtungen an Schlagadern zur Regelung des Blutstromes. Anat. Anz. 83, 40—44 (1937). — MERKEL, H.: Zur Histologie der Lungengefäße. Beitr. path. Anat. 105, 176—202 (1941). — NEUMANN, R.: Die Cardiaorta als Organ und ihr Verhalten bei Cononarsklerose. Virchows Arch. path. Anat. 303, 1—20 (1939). — PRETO PARVIS, V.: Sulle arterie a muscolature longitudinale interna annessa ai bronchi. Arch. ital. Anat. Embriol. 58, 359—387 (1954). — RATZENHOFER, M.: Zur Bildung von Längsmuskulatur in Blutgefäßen. Verh. dtsh. Ges. Path. (36. Tagg) 1953, 267—278. — SCHUMACHER, S. v.: Arteriovenöse Anastomosen in den Zehen der Vögel. Arch. mikr. Anat. 87, 309—340 (1915). — STUTZ, E.: Bronchographische Beiträge zur normalen und pathologischen Physiologie der Lunge. Fortschr. Röntgenstr. 72, 309—340 (1949). — TOENDURY, G., u. E. WEIBEL: Über das Vorkommen von Blutgefäßanastomosen in der menschlichen Lunge. Schweiz. med. Wschr. 1956, 265—269. — VERLOOP, M. C.: The bronchial arteries and their anastomoses with the Aa. pulmonales in the human lung. Acta anat. (Basel) 5, 171—205 (1948). — WATZKA, M.: Über Gefäßsperrern und arteriovenöse Anastomosen. Z. mikr.-anat. Forsch. 39, 521—544 (1936).

Dr. EWALD WEIBEL, Anatomisches Institut der Universität, Zürich/Schweiz