FASZIEN

ARCHITEKTUR DES MENSCHLICHEN FASZIENGEWEBES

Jean-Claude GUIMBERTEAU
Colin ARMSTRONG
Klaas STECHMANN (Herausgeber)

Geleitworte von
Thomas W. FINDLEY
Adalbert I. KAPANDJI

Mit 400 Abbildungen und 90 einzigartigen Videosequenzen

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort von Thomas Findley 7
Geleitwort von Adalbert I. Kapandji 9
Vorwort von Jean-Claude Guimberteau 11
Vorwort von Colin Armstrong 13
Vorwort zur deutschen Ausgabe 15
Liste der Gastautoren 17

Zur Benutzung dieses Buches 18

A
Einleitung 21

Geschichte und Architektur des Lebens 23
Beobachtungen eines Chirurgen 24
Die Rückkehr chirurgischer Forschung 25
Innergewebliche Endoskopie 26

Kapitel 1
Gewebekontinuität 33

Frühe Theorien über Gewebeelastizität 34
Ein neuer Denkansatz dank perioperativer innergeweblicher Endoskopie 35
Generelle anatomische Schlussfolgerungen 37
Spezielle anatomische Schlussfolgerungen 44
Zusammenfassung 77
Der rote Faden 78
Kommentar von Thomas W. Myers, LMT 79

Kapitel 2
Fibrilläre Kontinuität und Form 83

Die strukturgebende Rolle des mikrovakuolären Netzwerks 84
Das fibrilläre Gerüst 92
Das Konzept strukturierter Form 101
Der rote Faden 104
Kommentar von Robert Schleip, MA, PhD 104

Kapitel 3
Mobilität und Anpassungsfähigkeit 107

Erhaltung von Gewebekontinuität unter Bewegung 108
Mechanisches Verhalten von Fibrillen und Fasern unter Bewegung 109
Allgemeine mechanische Ergebnisse 116
Der rote Faden 118
Kommentar von Jean-Pierre Barral, DO 119

Kapitel 4
Die Beziehung zwischen Zellen und fibrillärer Architektur 121

Zellmorphologie und -verteilung 122
Die Beziehung zwischen Fasern und Zellen 126
Der rote Faden 135
Schlussfolgerung 135
Kommentar von James L. Oschman, PhD 136
Kommentar von Leon Chaitow, ND, DO 138

Kapitel 5
Anordnung im Raum – Tensegrity und Fraktalisierung 141

Physikalische Phänomene, die lebendes Gewebe beeinflussen 142
Maximale Abdeckung einer glatten Oberfläche: Ausfüllen des zweidimensionalen Raums 143
Ausfüllen des dreidimensionalen Raums 144
Gleichgewicht in Ruhe und Bewegung 149
Wie Form der Schwerkraft widerstehen kann: Tensegrity 153
Biotensegrity 157

Was ist fraktale Organisation? 160
Der rote Faden 166
Kommentar von Stephen M. Levin, BS, MD 166

Kapitel 6
Anpassungen und Modifizierungen des multifibrillären Netzwerks 171

Narbengewebe und Verklebungen 172
Megavakuoläre Transformation 185
Zelluläre Überfrachtung 188
Gewichtsverlust 191
Altern 191
Die sichtbaren mechanischen Effekte manueller Therapie 191
Der rote Faden 192
Kommentar von John F. Barnes, PT, LMT, NCTMB 193
Kommentar von Kenzo Kase, DC 194
Kommentar von Willem Fourie, PT, MSc 195

Kapitel 7
Das Bindegewebe als architektonisch konstitutives und formgebendes Gewebe 197

Form lässt sich beschreiben 198
Form ist beweglich 203
Formen können komplexe Gestalten ausbilden 206
Kommentar von Serge Gracovetsky, PhD 211

B
Nachwort 213

Warum benutzt die Natur räumlich einfache, jedoch unregelmäßige polyedrische Formen, um eine große Bandbreite an komplexen Formen auszubilden? 214
Sind Bewegungen prädeterminiert oder willkürlicher Natur? 217
Warum sollte eine unregelmäßige, chaotische, fraktale, nicht lineare Organisation existieren, wenn Ordnung und Linearität sich bereits als effektiv erwiesen haben? 219
Kann das multifibrilläre System zelluläre Prozesse auf genetischer Ebene beeinflussen? 224
Schlussfolgerung 229
Kommentar von Torsten Liem, DO, MSc, MSc 230

C
Anhang 233

Glossar 234
Literaturverweise im Text 237
Register 238

Der Fortschritt in digitaler endoskopischer Videofotografie erlaubt es uns inzwischen, lebendige Bestandteile der menschlichen Form sichtbar zu machen. *In-vivo*-Beobachtungen (Abb. Einleitung 1) zeigen strukturelle Elemente, die anhand von Leichenpräparation oder konservierten Gewebeproben (Abb. Einleitung 2) nur schwer zuzuordnen wären. Selbst hoch entwickelte histologische Verfahren scheitern bei der Darstellung dieser Strukturen. Mithilfe digitaler Videoendoskopie jedoch gelingt es, lebendiges Gewebe – große Mengen an Fasern, Fibrillen und Mikrofibrillen – sowohl auf **mesoskopischer** als auch **mikroskopischer** Ebene darzustellen. Dieses kontinuierliche Netzwerk aus Fasern scheint den gesamten Körper zu durchziehen und zwingt uns, unsere Vorstellungen von der Organisation des lebenden Organismus zu überdenken. Wir dürfen den Körper nicht länger als eine Ansammlung zellulärer Organe ansehen, die von Bindegewebe bloß zusammengehalten werden. Stattdessen müssen wir ihn als ein **konstitutives** fibrilläres Netzwerk betrachten, in dem die Organe sich jeweils den lokalen Gegebenheiten angepasst

Abb. Einleitung 1

Perimuskuläres fibrilläres Netz während chirurgischer Endoskopie eines lebenden Patienten (*in vivo* – tatsächliche Größe).

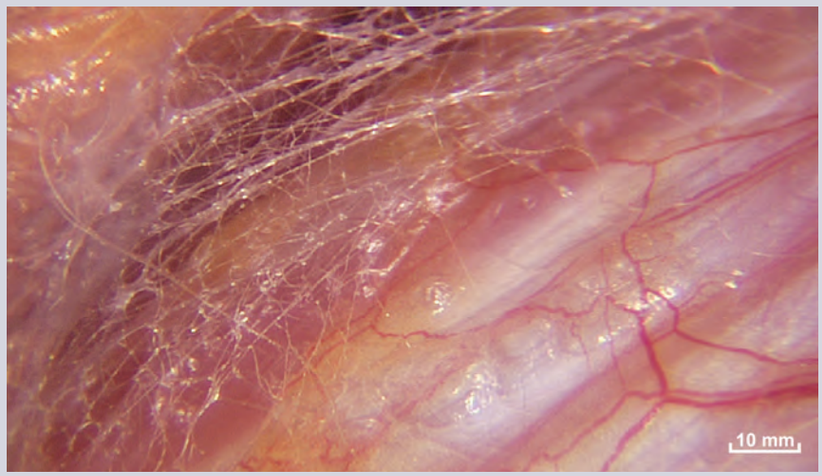
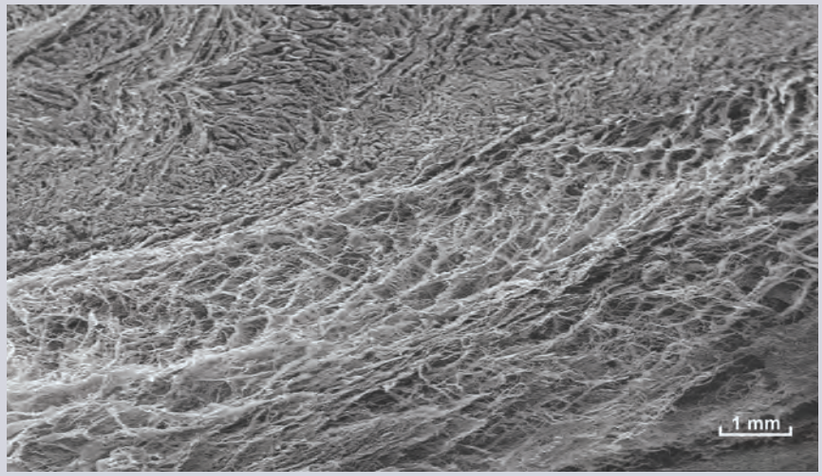


Abb. Einleitung 2

Perimuskuläres fibrilläres Netz, tot und präpariert, aufgenommen durch ein Rasterelektronenmikroskop (*in vitro* – 10fach). (In Zusammenarbeit mit J.-P. Delage, INSERM, Université Bordeaux 2, Frankreich)



haben. Zellen mit ähnlich spezifischen, physiologisch spezialisierten Funktionen finden sich innerhalb des **multifibrillären** Netzwerks zusammen, um Organe auszubilden. Die Zellen sind dabei im fibrillären Gerüst eingebettet und erfahren ihre notwendige Unterstützung.

Dieses grundlegende architektonische Muster gilt für alle Organe, auch für Haut, Fett, Muskeln, Knochen, Sehnen, Nerven und Blutgefäße.

Schlüsselwissen

Ein Ziel dieses Buches ist es, ein neues Modell vorzuschlagen, dass das strukturelle Gerüst des menschlichen Körpers und auch die grundlegende Architektur von lebendem Gewebe beschreibt – mit anderen Worten, eine neue strukturelle Ontologie.

Geschichte und Architektur des Lebens

Form im Wandel der Zeiten

Alles hat eine Form. Menschen haben eine Form. Wir sind Volumen aus lebendem Gewebe, umgeben von anderen natürlichen Formen, inaktiven oder lebenden. Im Wandel der Zeiten wurde Gestalt stets aus der Perspektive der Erscheinungsform verstanden, ohne nach der internen Organisation von Strukturen zu fragen.

Dies lässt sich damit erklären, dass aufgrund der beschränkten technologischen Gegebenheiten lebendes Gewebe aus der Nähe nicht untersucht werden konnte. Die strukturalistische Vorstellung von Leben, die sich im 19. Jahrhundert herausbildete, war eng verknüpft mit den technologischen Fortschritten, die zur selben Zeit im Bereich der optischen Beobachtung Einzug hielten.

Gleichwohl hat die Organisation des Lebens es schon immer verstanden, den Menschen zu faszinieren. Jahrhundertelang wurde dieser Diskurs allein unter Philosophen und Theologen ausgetragen. Das Zeitalter der Aufklärung im 17. und 18. Jahrhundert markiert schließlich den Beginn einer ernsthaften Auseinandersetzung mit dieser Frage. Geoffroy Saint-Hilaire, ein Zoologe, entwickelte die „Theorie von der Einheit des Bauplans“ (*unité de plan*) und trachtete danach, der Natur der Verbindungen auf den Grund zu gehen, die die verschiedenen Bestandteile einer organischen Einheit miteinander verknüpfen und die gleichzeitig für die Form jeder einzelnen Einheit verantwortlich sind. Er versuchte, eine rationale Erklärung für Form und Gestalt zu finden, indem er deren Inhalte studierte. Ein während des 19. und 20. Jahrhunderts erneut aufkommendes Interesse an wissenschaftlicher Forschung und technischem Fortschritt veränderte einmal mehr unsere Wahrnehmung von Form, was zu einer weiteren Auseinandersetzung mit ihren physikalischen und dreidimensionalen Aspekten führte. Dies war jedoch kein leichtes Vorhaben – mehrere Schritte waren vonnöten.

Darwin entwarf sein Konzept hinsichtlich der „adaptiven Zweckbestimmtheit“ und, wahrscheinlich noch bedeutender, bestätigte den Verdacht, Menschen seien Teil der Tierwelt. Seine **Adaptationsteleologie** wurde jedoch heftig angezweifelt, zunächst von Sir D’Arcy Wentworth Thompson, einem schottischen Biologen und Mathematiker. Sein Buch *Über Wachstum und Form* aus dem Jahr 1917, war Wegbereiter für die wissenschaftliche Erklärung der Morphogenese, des Prozesses, der Mustern und Strukturen in Pflanzen und Tieren Form gibt.[1] Er behauptete, Wissenschaftler würden eine entscheidende Tatsache leugnen und zwar die physikalischen Kräfte, die für Form und Gestalt verantwortlich seien, und stattdessen die Bedeutung der Evolution überbewerten, die sie für die einzige sich auf Form und Struktur lebender Organismen auswirkende Größe hielten.

Die Entdeckung der Zelle und die Entschlüsselung des menschlichen Genoms im späten 20. Jahrhundert brachten ein solches Ausmaß an wissenschaftlicher Evidenz hervor, dass es schwierig war, Form und Gestalt noch unabhängig und ohne Bezug zum Inneren, dem genetischen Kode, anzusehen. Gene sollten jetzt alles kontrollieren und erklären, auch die Form und Formentstehung. Nach diesem Modell resultiert die Gestalt organischer Einheiten direkt aus der unmittelbaren räumlichen Nachbarschaft verschiedener struktureller Elemente. Dies kann zutreffen, jedoch erklärt dieser Ansatz weder alles, noch liefert er eine zufriedenstellende Erklärung für die Entstehung von Form oder ihren Erhalt bei Bewegungen. Unser Verständnis von Form und Gestalt blieb aufgrund der Nichtberücksichtigung ihrer räumlichen und architektonischen Aspekte begrenzt.

Form existiert und ist strukturiert, aber auf welche Weise ist sie strukturiert? Stellt die Zelle die einzige, allem zugrunde liegende Einheit dar, oder gibt es noch eine weitere Erklärung? Wir müssen einen Kurs einschlagen, der uns zwischen einer unter historischen Einflüssen leidenden philosophischen Vision und einem metaphysischen Modell, das wissenschaftliche Beweise liefert, hindurch navigiert.

Dank moderner Technologie ist die Beobachtung lebenden Gewebes wieder eine wichtige Methode wissenschaftlicher Forschung geworden, und ihre Ergebnisse sind ernst zu nehmen. Dabei wäre es fatal, sich von Theorien leiten zu lassen, deren Konzepte zwar attraktiv, aber in Wirklichkeit unzureichend sind. Aus diesem Grund werden wir zuerst schlicht beschreiben, was wir durch ein Endoskop sehen können, bevor wir versuchen, das Gesehene zu erklären.

Beobachtungen eines Chirurgen

Wissenschaftliche Grundlagenforschung schien sich aus den OP-Sälen verabschiedet zu haben. In jüngster Vergangenheit waren Chirurgen immer weniger in physiologische und biologische Fragestellungen involviert. Moderne Chirurgen neigen dazu, sich voll und ganz ihrer Rolle als Ärzte und Praktiker hinzugeben, da operative Verfahren heutzutage neben höchst anspruchsvoller Handhabung die Kapazitäten eines Arbeitslebens meist bereits komplett ausfüllen.

Dies war jedoch nicht immer so, und in der Vergangenheit waren es oft bedeutende Chirurgen, die zu wichtigen Meilensteinen des wissenschaftlichen Fortschritts beigetragen haben. Mittlerweile jedoch hat sich das Blatt gewendet. Moderne wissenschaftliche Forschung hat sich von anatomischen Präparationen und Beobachtungen auf der mesoskopischen Ebene im OP-Saal verabschiedet und befasst sich stattdessen mit immer kleineren Strukturen, die sich allein unter einem Mikroskop im Labor studieren lassen. Publikationen florieren, und ein reichhaltiges Spektrum an Informationen ist über das Internet für jeden leicht zugänglich. Die Informationsfülle ist jedoch bruchstückhaft, und Wissenschaftlern kann es leicht passieren, sich in Details zu verlieren – und damit den Überblick. Die Wissenschaft hat sich stark in kleinere Untergruppen aufgegliedert, in denen Wissenschaftler verschiedener Fachrichtungen für sich arbeiten und dabei Schwierigkeiten haben, sich untereinander zu verständigen. Tatsachen erscheinen einander gegensätzlich, obwohl sie sich tatsächlich dem gleichen Phänomen nähern, aber aus verschiedenen Richtungen. Es ist an der Zeit, die Einzelteile wieder zu einem sinnvollen großen Ganzen zusammenzusetzen.

Chirurgen wird im Vergleich zu anderen Wissenschaftlern eine privilegierte Position zuteil. Sie sind Handwerker, die sich mit lebendem Gewebe auskennen und durch ihre Arbeit die Möglichkeit haben, beachtliche Einblicke in dessen Verhalten zu bekommen. Sie treten täglich mit lebendigem, menschlichem Gewebe in Kontakt, und ihr durch Behandlungen und Beobachtungen erworbenes Wissen ist unerlässlich und von erheblichem Wert. Wenn Sie das Pulsieren einer Arterie, die serpentinenartigen Bewegungen einer Darmschlinge oder die Dilatation pulmonaler Alveoli sehen, werden Sie Zeuge einer Lebensäußerung in ihren verschiedenen Formen, und Sie kommen nicht umhin, die ungeheure Vielfalt von Form und Gestalt lebender Strukturen schätzen zu lernen. Diese Information ist eine komplett andere als das Wissen, das Sie sich anhand der Gewebeproben von Laborratten oder -hamstern aneignen können. Es ist weder mehr noch weniger wichtig, sondern ergänzend – und es kann nicht ignoriert werden.

Die Rückkehr chirurgischer Forschung

Moderner technischer Fortschritt und hochauflösende digitale Videoaufnahmen erlauben Chirurgen heute, lebendes Gewebe aus größerer Nähe detaillierter wahrzunehmen als bisher. Der Chirurg kann nun hochauflösende Bilder erhalten, die einer Vergrößerung durch ein Mikroskop (40fach) ebenbürtig sind. Entscheidend ist jedoch, dass die Bilder nun *in vivo* und *in situ* aufgenommen werden können. Natürlich vermag ein Rasterelektronenmikroskop nach wie vor, Strukturen mit einer viel höheren Auflösung zu untersuchen, jedoch lässt sich die Methode nur auf Gewebeproben oder totes Gewebe anwenden. Diese Proben liegen dehydriert und durch zahlreiche mechanische und chemische Vorgänge aufgearbeitet vor. Es ist daher offensichtlich, dass diese sich nicht mit einer *In-vivo*-Untersuchung vergleichen lassen.

Trotz dieser Abstriche haben sowohl optische als auch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen grundlegend zu unserem Verständnis der Zelle beigetragen und Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert zu wichtigen Entdeckungen verholfen.

Es ist offensichtlich, dass eine zufriedenstellende biomechanische Erklärung der Gleitfähigkeit subkutaner Strukturen auf den grundlegenden Prinzipien der Strömungslehre basieren muss. Hier spielt **osmotischer Druck** eine Schlüsselrolle, und ich verweise auf Prinzipien des oberflächlichen Zugs sowie **Van-der-Waals-Kräfte** (Prof. Herbage, INSERM Laboratories, Lyon, Frankreich, November 2004 nach persönlicher Kommunikation).

Abb. 2.22

A Ein Hautschnitt zeigt die Relevanz von Flüssigkeit im Körper (10fach).

B Flüssigkeit und Fasern stehen in engem Kontakt, können jedoch leicht voneinander getrennt werden (130fach).

C Flüssigkeit sickert in das gesamte Operationsfeld (130fach).

Video 2.9

Video 2.10

Video 2.11

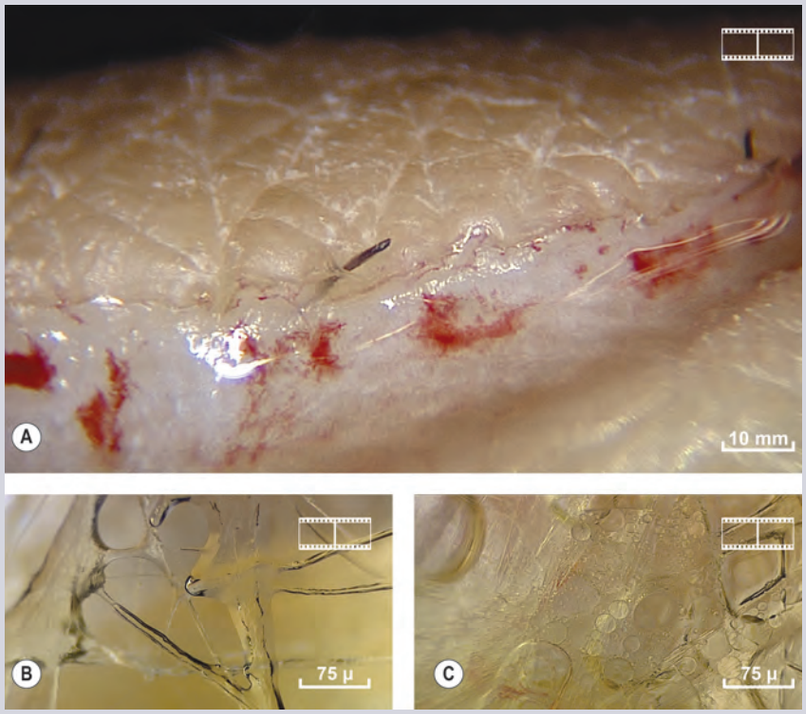
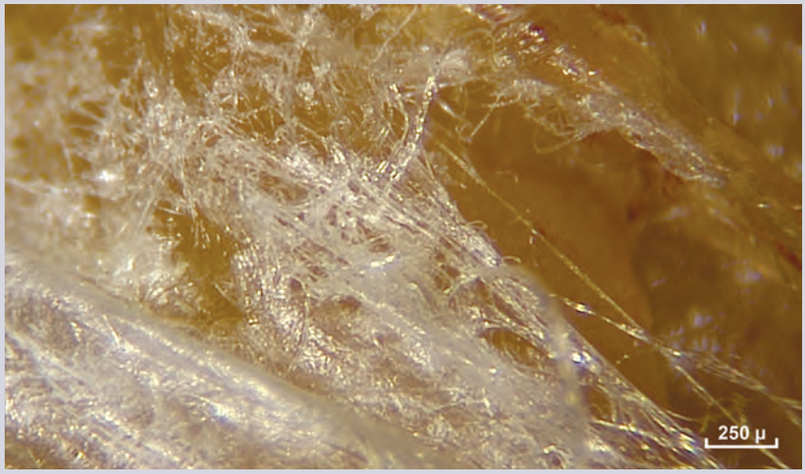


Abb. 2.23

Die rasche Gewebeaustrocknung während einer Operation ist ein allseits bekanntes Phänomen (40fach).



Innergewebliche Blasen

Wir finden oft Mikrobläschen innerhalb größerer fibrillärer Strukturen (Abb. 2.24). Ihre Größe weist eine enorme Bandbreite auf. Kollegen vermuten, dass diese Blasen in Wirklichkeit aus atmosphärischer Luft bestehen, die unabsichtlich während der Operation vom Gewebe eingeschlossen wurde – und dass es sich dabei um ein normales Phänomen handele. Wir beobachten dies jedoch zu häufig, als dass es zutreffen könnte. Natürlich müssen wir diesen Umstand noch näher untersuchen, um die gasige Zusammensetzung der Luft innerhalb dieser Bläschen genau bestimmen zu können. Gasaustausch ist eine mögliche Erklärung, und es ist zudem recht wahrscheinlich, dass bestimmte Fasern den Durchtritt einer Flüssigkeit erlauben, die wir „Lymphe" nennen, bei der es sich bekanntermaßen um interstitielle Flüssigkeit handelt. Die Endoskopie wird es uns ermöglichen, die Welt der Flüssigkeit und Fibrillen in Zukunft besser zu verstehen und zu beschreiben.

Innerhalb des mikrovakuolären Netzwerks widerstehen die Fasern Zugkräften, und die innermikrovakuoläre Flüssigkeit hält Kompression stand. Das Residualvolumen der Mikrovakuolen verhält sich konstant. Dies ermöglicht uns, eine Erklärung über die Wasserverteilung innerhalb des Körpers zu formulieren. Selbstverständlich muss ein solcher Erklärungsversuch auch alle übrigen Erfordernisse lebenden Gewebes berücksichtigen.

Das Konzept strukturierter Form

In Kapitel 1 fragten wir uns: „Wie ist die Gewebekontinuität strukturiert und auf welche Weise stellen die Fasern eine Gewebekohäsion sicher? Wie kommen sie zusammen, um eine strukturierte Form auszubilden?"

Schlüsselwissen

Die kontinuierliche, permanente Verbindung zwischen allen Komponenten des mikrovakuolären Systems stellt eine architektonische Organisation und ein fibrilläres Netzwerk zur Verfügung, die das Konzept strukturierter Form erklären und bestätigen (Abb. 2.25).

Indem sich die Fasern auf eine irreguläre, fraktale Weise verbinden, bestimmen sie das Volumen einer Mikrovakuole, die mit einem GAG-Gel ausgefüllt ist. Durch Akkumulation und Überlagerung bilden die multimikrovakuolären polyedrischen Einheiten aufwendige Formen aus. Das resultierende fibrilläre Netzwerk übt die gesuchte strukturgebende Rolle im Körper aus.

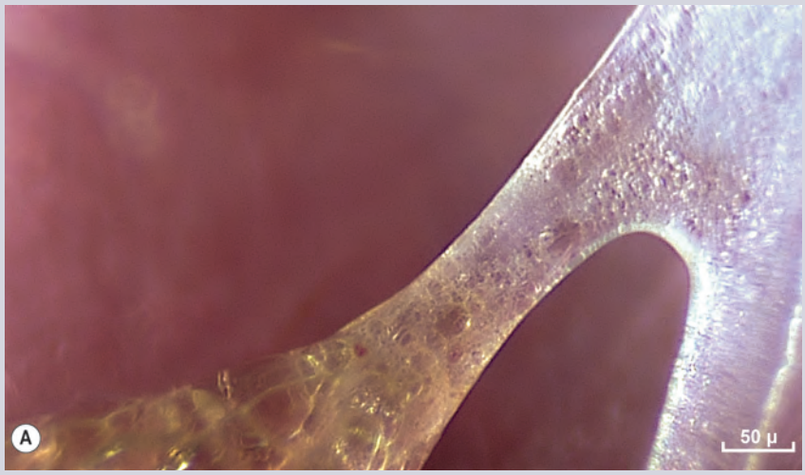
Schlüsselwissen

Eine lebende Gestalt muss *strukturiert* sein, aber gleichzeitig *mobil, geschmeidig, anpassungsfähig* und *selbsterhaltend*.

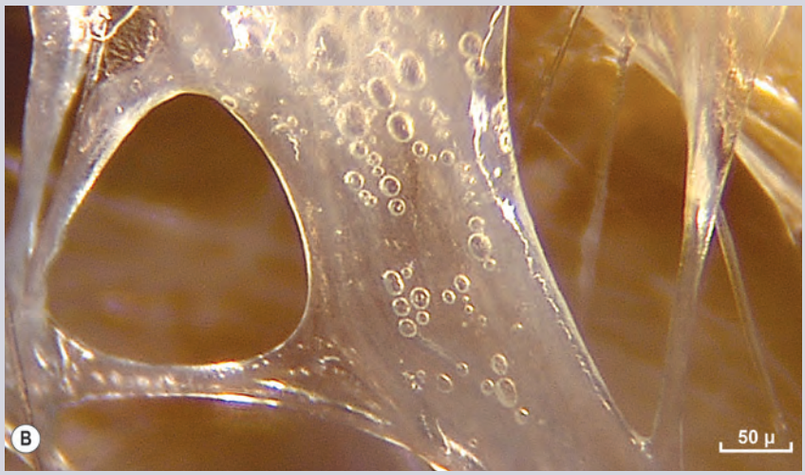
Abb. 2.24

Innerhalb großer fibrillärer Strukturen sehen wir häufig Mikrobläschen unterschiedlicher Größen. Dies lässt sich mit Gasaustausch erklären. Bis heute verstehen wir das Phänomen jedoch noch nicht vollends.

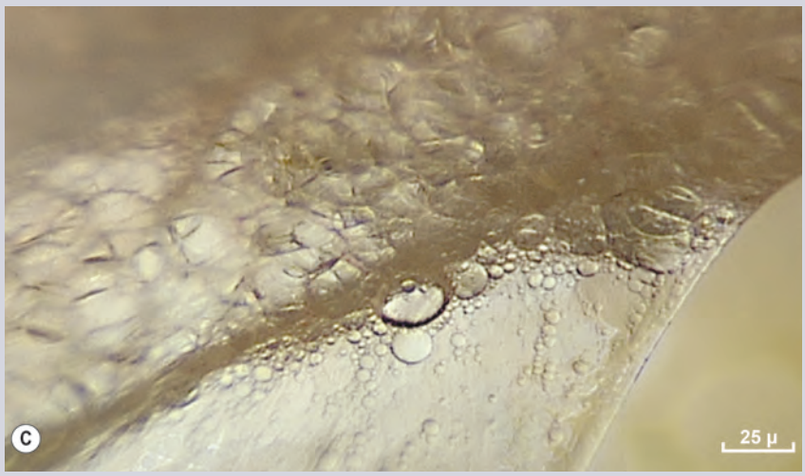
A 200fache Vergrößerung



B 200fache Vergrößerung



C 400fache Vergrößerung



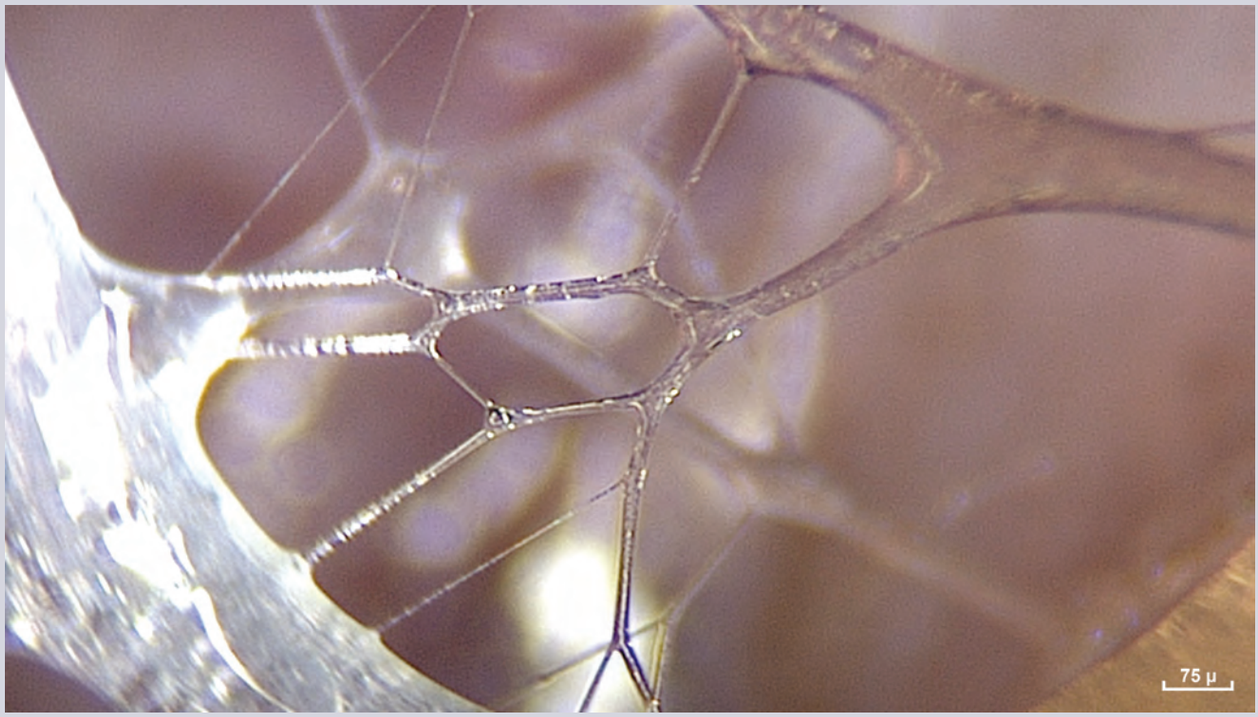


Abb. 2.25

Unsere Vorstellung strukturierter Form ist das Resultat der architektonischen Organisation und der kontinuierlichen, permanenten Verbindung zwischen allen Komponenten. Der Einfluss verschiedener physikalischer Kräfte spielt eine entscheidende Rolle in der Erzeugung und Erhaltung einer strukturierten Form.

- **Mobilität.** Das bedeutet, dass die Strukturen sich gemeinsam harmonisch bewegen, um erforderliche Aufgaben zu erfüllen, ohne benachbarte und periphere Strukturen zu beeinflussen. Die mobilen Strukturen sind mit einer Art Gewebegedächtnis ausgestattet, das sie dazu befähigt, stets in ihren ursprünglichen Zustand zurückzukehren, sobald sie die gewünschte Aktion ausgeführt haben – vorausgesetzt, sie haben den mechanischen Stress unbeschädigt überstanden.
- **Geschmeidigkeit.** Strukturen müssen biegsam sein, ohne dabei Schaden zu nehmen oder zu reißen, um bereitwillig auf mechanischen Stress zu reagieren und die funktionelle Unabhängigkeit der Komponenten sicherzustellen.
- **Anpassungsfähigkeit.** Eine adaptive Struktur ist in der Lage, umgehend auf jeden unerwarteten mechanischen Stress zu reagieren, der eine Formveränderung erfordert – beispielsweise bei plötzlich ausgeübtem lokalem Zug.
- **Selbsterhaltung.** Selbsterhaltung bedeutet, dass die essenziellen Anforderungen des Lebens, wie das konstante Diffundieren von elektrischer Energie, Sauerstoff und metabolischen Faktoren, sichergestellt werden und zwar unabhängig von jeglichem einwirkendem Stress oder sonstiger physikalischer Anstrengung. Dies kann nur erreicht werden, wenn die Pfade der Energieversorgung in die strukturelle Organisation des Gewebes integriert sind.

Es ist nicht schwierig, hier eine Parallele zum Ikosaeder oder Tetraeder der Mikrovakuole zu erkennen. Wir müssen zugeben, dass wir innerhalb des fibrillären Netzwerks zuweilen Formen erkennen, die uns an die Euklid'sche Geometrie erinnern, dies passiert jedoch eher selten. Es existiert allerdings ein direkter Zusammenhang zwischen der erkennbaren und unbestreitbaren Existenz von Mikrovakuolen und der Theorie der Tensegrity (Abb. 5.14). Mir ist keine weitere biomechanische Theorie bekannt, die eine ähnlich klare und rationale Erklärung dessen bereithält, was ich während meiner endoskopischen Explorationen beobachte. Wie wir gesehen haben, gleiten die Fibrillen aneinander entlang, teilen sich zuweilen in zwei, drei oder vier Subfibrillen und verteilen dabei augenblicklich die einwirkende Last auf neu formierte Räume. Dies liefert uns eine einfache Erklärung nicht nur über die Verteilung der Schwerkraft, sondern auch über die Fähigkeit, Bewegung zuzulassen, die sich in der Peripherie dermaßen abschwächt, dass die dortigen Strukturen nur noch leicht beeinflusst werden (Abb. 5.15 und Video 5.4).

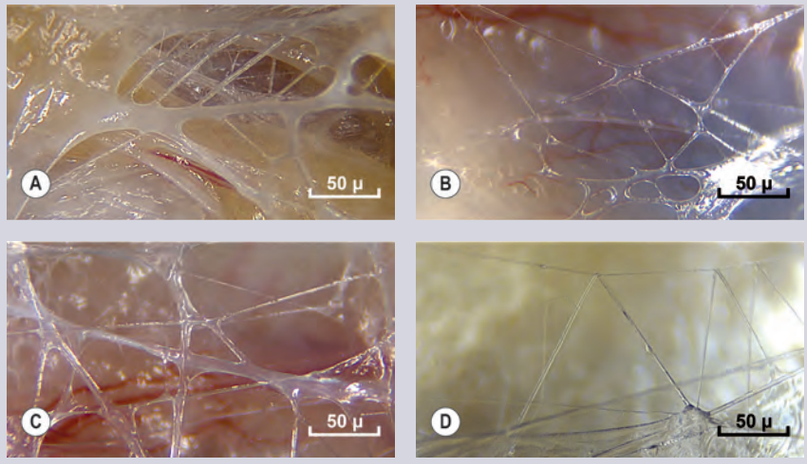


Abb. 5.14

Das Verhalten der Mikrovakuolen und des fibrillären Netzwerks ist gut mithilfe der Theorie der Tensegrity erklärbar. Es existiert eine Beziehung zwischen der beobachtbaren Existenz von Mikrovakuolen und der Theorie der Tensegrity, die nicht zu unterschätzen ist.

A Parallele Anordnung von Fibrillen (200fach).

B Sich gegenüberliegende Dreiecke (200fach).

C Übereinanderliegende Dreiecke (200fach).

D Eine Abfolge von Dreiecken (200fach).

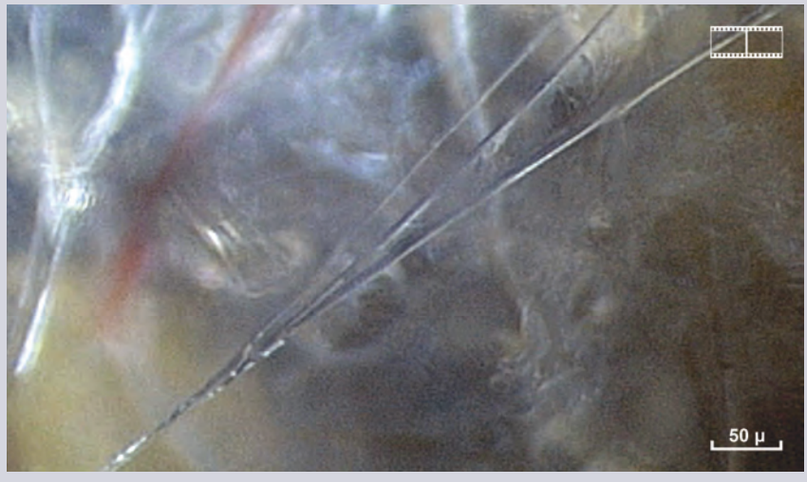


Abb. 5.15

Trifurkation (eine Unterteilung in drei Äste) einer Fibrille. Dieser Mechanismus verteilt und absorbiert Kraft innerhalb des fibrillären Netzwerks (200fach).

Video 5.4

Biotensegrity

Biotensegrity, ein von Stephen Levin eingeführter Begriff, bezeichnet die Anwendung der Prinzipien der Tensegrity auf lebendes Gewebe.* Sie vereint das Element der Zugspannung mit dem Konzept des unter Strukturen herrschenden Gleichgewichts und stellt somit einen wichtigen Beitrag für unser Verständnis von der Organisation anatomischer Strukturen dar. Biotensegrity kann auf alle biologischen Organismen angewendet werden – von der Ebene der Moleküle bis zur makroskopischen Sicht auf die Wirbelsäule.[10,11]

Genau wie die Tensegrity auf das Konzept der unter Spannung und Druck stehenden Elemente zurückgreift, ist Biotensegrity ein Modell für die Organisation lebenden Gewebes, bestehend aus einem Netzwerk aus sich überkreuzenden Kabeln und Stützpfeilern, die entweder Zug oder Druck ausgesetzt sind.

Diese Organisation würde ein perfektes Gleichgewicht unter den beteiligten Strukturen sicherstellen und zudem die Fähigkeit besitzen, der Schwerkraft zu widerstehen. Wenn sich das Modell auf lebendes Gewebe anwenden ließe, würde es erklären, wie solch grundlegende Strukturen sich in allen Ebenen bzw. Größenordnungen an der Konstruktion des menschlichen Körpers beteiligen können, von einzelnen Molekülen bis hin zur finalen, makroskopisch erkennbaren Gestalt.

Das Biotensegrity-Modell bedient sich geometrischer Formen – den Platon'schen Ikosaedern vergleichbar. Jene Ikosaeder jedoch sind idealisierte Kraftübermittler und keine natürlichen Strukturen, wie sie im Körper vorkommen. Die aus Stäben und Schnüren bestehenden Modelle repräsentieren dynamische Kräfte innerhalb eines Milieus, das kontinuierlichem Wandel unterworfen ist. Die Kräfte wirken gleichzeitig auf subzellulärer, zellulärer, regionaler und übergeordneter Ebene und dürften sich daher im makroskopischen Maßstab als auch dem der Newton'schen Physik und sogar der Quantenphysik nachvollziehen lassen.

Das theoretische Modell, einzigartig in seinem Versuch, den Einfluss der Schwerkraft auf die menschliche Architektur zu erklären, lässt sich jedoch nicht gänzlich auf einen lebenden Organismus übertragen. Die Biologie übt mit ihren Gesetzen, Formen und zahllosen weiteren Eigenschaften, die sich *in vivo* zeigen, umfassenden Einfluss aus. Dies fügt eine weitere Dimension zur Gleichung hinzu – gleichzeitig einzigartig und komplexer:

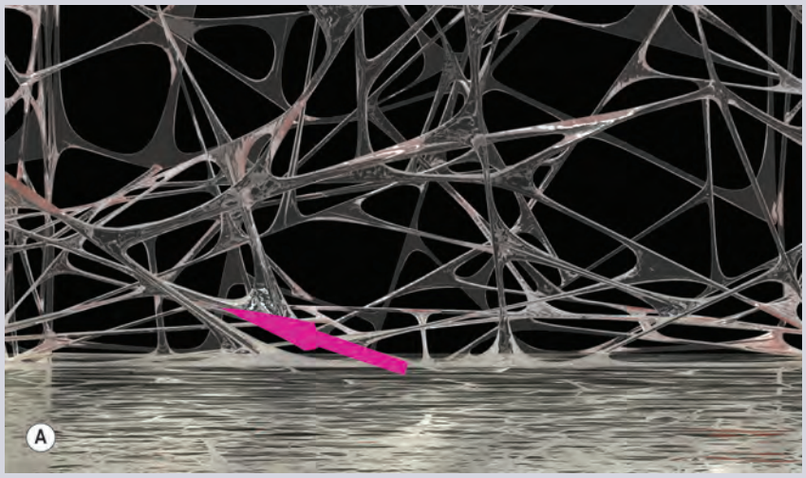
- Das lebende Gewebe, das die Architektur menschlicher Form ausmacht, besteht aus Zellen und Fasern, die dreidimensionale Mikrovolumina ausbilden. Diese grundlegenden architektonischen Einheiten sind gleichzeitig polyedrisch *und* unregelmäßig und stehen in totaler Kontinuität unter Spannung. Ihre Anordnung und Verteilung weist kein ersichtliches Muster auf und steht in keinem Einklang mit der Euklid'schen Geometrie oder linearer Mathematik. Stattdessen

* Anmerkung der Übersetzerin: In der deutschen Literatur wird die eingedeutschte Form ‚Tensegrität' uneinheitlich neben den Begriffen ‚Biotensegrity' und ‚Tensegrity' benutzt, wenn von biologischen Organismen die Rede ist. In diesem Buch werden der Übersichtlichkeit halber für das zugrunde liegende architektonische Konzept und dessen Anwendung in der Biomechanik jeweils die englischen Begriffe ‚Tensegrity' bzw. ‚Biotensegrity' verwendet.

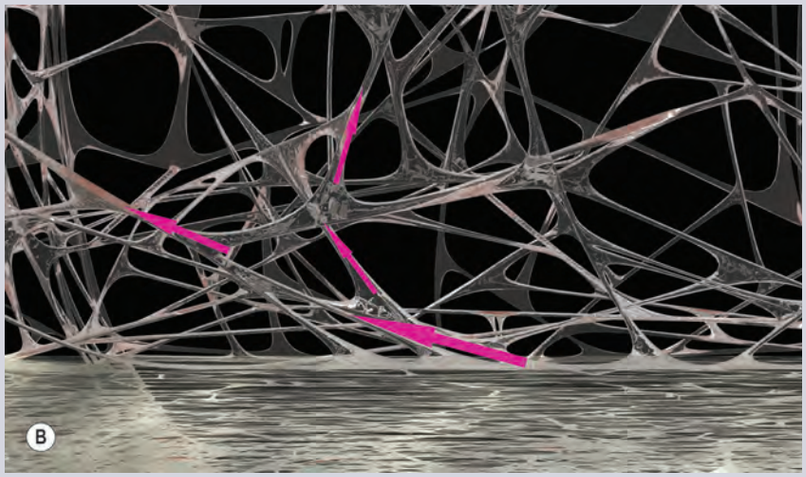
Abb. 5.16

Es existiert ein Element scheinbarer Willkür und Unvorhersehbarkeit, das für die mikrovakuoläre Bewegung kennzeichnend ist.

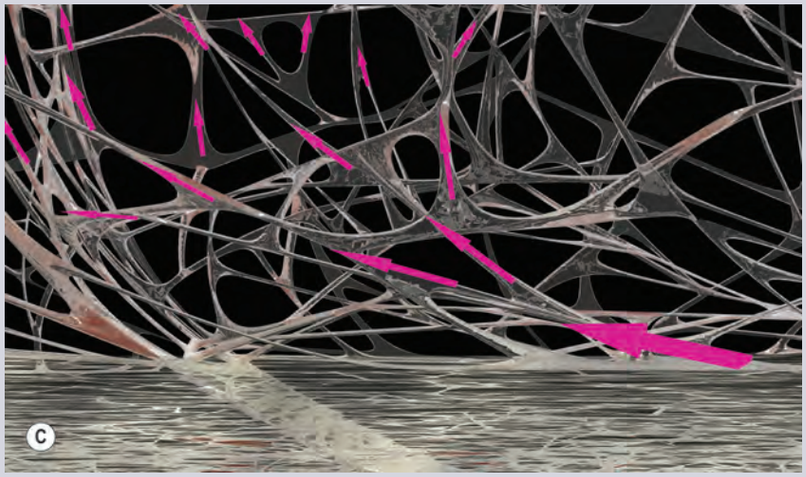
A Eine Dehnung induzierende Kraft erreicht das fibrilläre Netzwerk.



B Die Fibrillen dehnen sich notgedrungen.



C Die Mikrovakuolen adaptieren sich an den Stress und verändern ihre Gestalt.



scheint eine nicht lineare und chaotische, jedoch *effiziente* Organisation zu herrschen. Effizienz ist eine Eigenschaft aller komplexen Systeme.

- In einem lebenden Organismus existieren keine leeren Räume. Die Mikrovolumina zwischen den Zellen sind entweder mit Zellen, ihren eigenen Zytoskeletten oder druckdichten Flüssigkeiten ausgefüllt. Ihre Komponenten verhalten sich hydrophil. Sie sind aufgrund der Akkumulation ihrer konstanten Volumina formgebend. Die druckdichten intravakuolären Komponenten sind lokalisierte Kompressionsbereiche innerhalb des kontinuierlichen Zugnetzwerks aus Fasern.
- Die Mobilität der Fibrillen wird durch deren Fähigkeit, sich zu dehnen und zu *dissoziieren*, gewährt. Dynamische Fraktalisierung ist der Begriff, den ich benutze, um diese Dissoziation zu beschreiben. Sie erlaubt, eine einwirkende Last zu absorbieren und zwar in jeglichen Größenordnungen lebendiger Organismen. Dies erklärt die Fähigkeit, der Schwerkraft oder jeder weiteren einwirkenden Kraft zu widerstehen.
- Dynamische Fraktalisierung vereint nichtlineares Verhalten mit unvorhersehbaren sowie **deterministischen** Charakteristika. Das polyedrische Gerüst der Mikrovakuole ist niemals stabil und tendiert jederzeit zu Veränderung. Dieses Element der Willkür und Unvorhersehbarkeit ist kennzeichnend für mikrovakuoläre Bewegung (Abb. 5.16). Die Gestalt des intramikrovakuolären Volumens ist nie konstant und das ihr innewohnende Potenzial zur Veränderung der Gestalt beachtlich.
- Meine Beobachtungen zeigen, dass es keine Hierarchie bei der Anordnung fibrillärer Strukturen im Körper gibt. Sie sind nicht wie gespannte Kabel oder starre Druckstäbe organisiert. Im Biotensegrity-Modell findet die Bewegung an den Kreuzungen dieser Kabel und Druckstäbe statt, meine Beobachtungen hingegen zeigen, dass sich Fibrillen in vielen verschiedenen Richtungen bewegen können – sie können sich verlängern, verkürzen, sich aneinander entlang bewegen und unterteilen (Abb. 5.17).
- Zudem berücksichtigt Biotensegrity keine Unterschiede in den Faserqualitäten. Das Fibrillengerüst kann auf eine Erhöhung der Zugspannung reagieren, indem es seine Fasern mit zusätzlichem Kollagen verstärkt. Ich habe gesehen, dass als Antwort auf wiederholten Stress die Widerstandsfähigkeit der Fibrillen zunahm, was nahelegt, dass die *Qualität* von Fasern sich verändern kann. Auch die *Quantität* der Fibrillen steigt als eine Folge mechanischer Beanspruchung (Abb. 5.18 und Video 5.5 A und B).

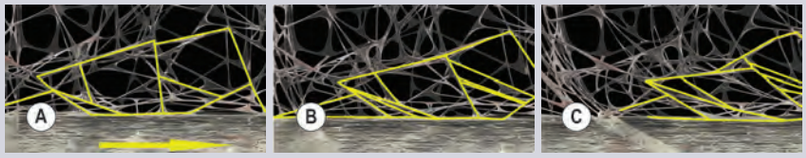


Abb. 5.17

Fortsetzung von Abb. 5.16: Dehnung, Teilung und Gleiteigenschaften

A Der Stress breitet sich schrittweise aus …

B … verteilt sich …

C … und wird vom fibrillären Netzwerk absorbiert.

Ausblick Jetzt, da wir unsere Beobachtungen über die Struktur lebendigen Gewebes dargelegt haben, können wir festhalten, dass ‚Form' das morphologische Ergebnis des fraktalen, chaotischen Netzes aus ineinander verwundenen Fibrillen ist, die eine architektonische und auch strukturelle Schlüsselrolle in lebendigem Gewebe spielen.

Form lässt sich beschreiben

Was wissenschaftliche Beobachtung zutage gebracht hat

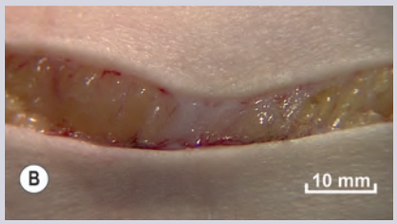
Wie wir in der Einleitung gesehen haben, ist die Organisation innerhalb lebendiger Organismen schon seit jeher Gegenstand wissenschaftlicher Forschung gewesen. Die Sprache und die Konzepte zur Beschreibung solcher Organisationsformen stehen unter dem Einfluss unterschiedlicher – mitunter metaphysischer – Annahmen über Form und deren Bestandteile. Heutzutage sind wir jedoch durch den technologischen Fortschritt in der Lage, *lebendes* Gewebe mikroanatomisch zu untersuchen und können uns auf eine objektivierbare, wissenschaftlich fundierte Synthese von Form und Funktion zubewegen und die Vorstellungen der Vergangenheit hinter uns lassen. Die objektivierbare wissenschaftliche Beobachtung ist der einzige Weg nach vorn und der einzig sinnvolle Ansatz (Abb. 7.1 und Video 7.1).

Die multifibrilläre Architektur des Extrazellulärraums

Ein Privileg des mikrochirurgisch tätigen Transplantations- und Plastischen Chirurgen ist die Möglichkeit, in verschiedenen Bereichen des Körpers zu operieren und dadurch ein umfassendes Wissen über die menschliche Anatomie zu erwerben. Jeder Chirurg, der die Mikrochirurgie ausübt, wird bestätigen, dass fibrilläres Gewebe überall im Körper anzutreffen ist. Durch endoskopische Beobachtung entdecken

Abb. 7.1
Endoskopische Beobachtungen bestätigen die Kontinuität der Architektur lebendiger Organismen. Ein kontinuierliches globales Netzwerk aus miteinander in drei Dimensionen konnektierten Fibrillen verbindet alle Bestandteile einer Form zu einer organischen Einheit (10fach).

Video 7.1



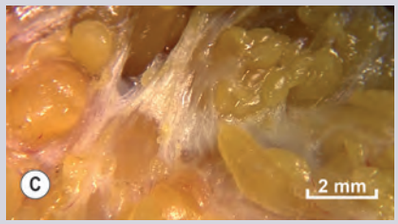


Abb. 7.2

Es ist nicht einfach, einen unwiderlegbaren Beweis für die Beziehung zwischen den Kollagenfasern und den Konturen des Körpers zu finden. Hier, am Ellenbogen eines übergewichtigen Menschen, lässt sich diese Beziehung jedoch klar erkennen.

A Eingezogenes Gewebe unterhalb des Epikondylus

B Eine chirurgische Inzision in diese Einziehung enthüllt darunterliegende straffe Fasern.

C Gedehnte Fettlobuli, entstanden durch ein Überangebot an Adipozyten, haben diese Fasern unter Spannung gesetzt. Diese fibrilläre Spannung reicht bis in die Tiefen des darunterliegenden Gewebes (5fach).

wir es selbst im letzten Winkel unserer Anatomie. Es lässt sich in Muskeln, in und um Sehnen, Blutgefäßen, Nerven und im Periost finden. Alle Organe des Körpers scheinen auf demselben zugrunde liegenden fibrillären Gerüst zu beruhen – selbstverständlich mit unterschiedlichen architektonischen Eigenschaften. Die Fibrillen durchziehen nicht nur den gesamten Körper, sondern verbinden auch – auf mikroskopischer Ebene – die Zellen mit der Extrazellulärmatrix. Demzufolge liegt es auf der Hand, eine Beziehung zwischen dem kontinuierlichen fibrillären Netzwerk und der resultierenden Gestalt des Körpers abzuleiten und nach einem neuen architektonischen Modell zu suchen (Abb. 7.2).

Das fibrilläre Gewebe bildet also ein globales System aus. Es ist ein System vollständiger *Kontinuität*. Das Konzept von Gewebeschichten, fein säuberlich in verschiedenen Strata, Kompartimenten und Häuten organisiert ist – obwohl didaktisch in der Lehre der Anatomie sinnvoll – letztlich falsch.

Die Mikrovakuole als fundamentale architektonische Einheit des Körpers

Unsere Beobachtungen zeigen, dass dieses alles durchdringende Gewebe aus fibrillären Verbindungen in drei Dimensionen ausgebildet ist. Es verbindet alle Bestandteile des Körpers miteinander und bildet dadurch eine organische Einheit aus. Das Netzwerk aus ubiquitär vorhandenen Fibrillen verflechtet sich, um dreidimensionale polyedrische Mikroräume zu schaffen – die Mikrovakuolen –, die als die fundamentale *architektonische* Einheiten des Körpers betrachtet werden müssen. Sie sind angefüllt mit Glykosaminoglykanen, die wiederum entweder eingerahmt oder von Zellen unterschiedlicher Gestalt, Größe und Funktion besetzt werden (Abb. 7.3 und Video 7.2 und 7.3).

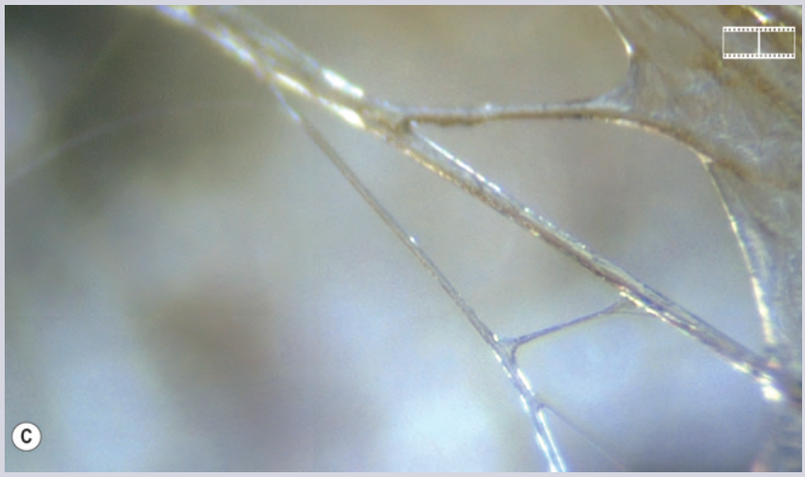
Abb. Nachwort 3

B Diese Sequenz zeigt das Gegenteil: eine starke, stabile Verbindung – prädeterminierte strukturelle Kontinuität (130fach).

Video Nachwort 1 B

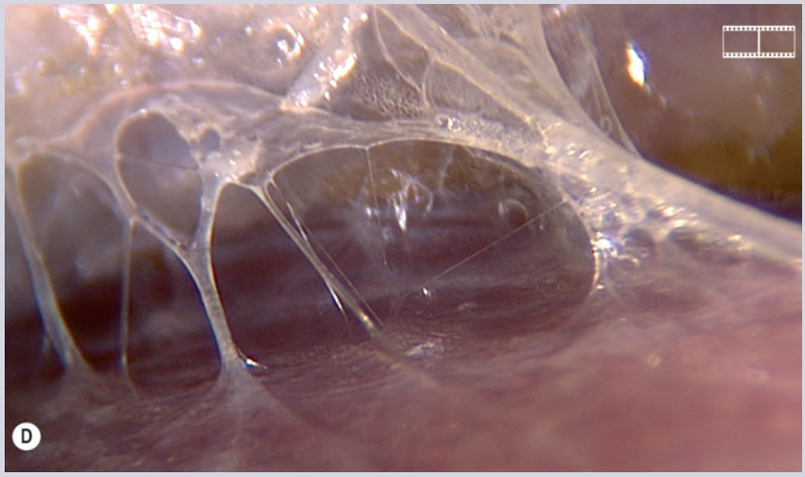
C Die Sequenz zeigt den Beginn einer scheinbar unberechenbaren Aktion. Die Fibrille war zuvor verborgen und erscheint plötzlich. Zudem befindet sie sich in einer Kontinuität zu den anderen Fibrillen. Dies zeigt den prädeterminierten Charakter dieser bestimmten Bewegung (100fach).

Video Nachwort 1 C



D Die Sequenz zeigt zwei verschiedene Fibrillenbewegungen, in einem zeitlichen Abstand von 10 Sekunden gefilmt, jedoch in demselben Bereich und unter demselben äußeren Einfluss von Stress. Die beiden Bewegungen sind nicht gleich. Die Initiation der Beweglichkeit der Fibrillen unterscheidet sich in beiden Fällen, verursacht durch das gleichzeitige Auftreten von scheinbar nicht deterministischem und prädeterminiertem, fibrillärem Verhalten. Jede Bewegung ist einzigartig (100fach).

Video Nachwort 1 D



Manchmal scheint eine bestimmte Bewegung unberechenbar zu sein, ist aber in Wahrheit prädeterminiert. Eine Fibrille, die zuvor verborgen war, erscheint plötzlich und erweist sich zudem als kontinuierlich mit einer anderen Fibrille verbunden. Sie zeigt uns auf diese Weise den prädeterminierten Charakter einer Bewegung (Abb. Nachwort 3 C und Video Nachwort 1 C). Allein diese spezifische Bewegung, exakt auf diese Weise ausgeführt, war möglich.

Die Vermischung aus willkürlichen und prädeterminierten Bewegungen von Abermillionen verschiedenen Fasern und Fibrillen erlaubt uns folgende Feststellung: Wenn Sie beispielsweise einen Löffel zur Hand nehmen und zu essen beginnen, werden Sie diese Geste niemals exakt wiederholen. Wenn Sie den Löffel zurück auf den Tisch legen, werden die vorgedehnten Fasern Ihres multifibrillären Netzwerks zurück in ihren Ursprungszustand kehren, jedoch nicht zwangsläufig genau die Position einnehmen, die sie innehatten, bevor Sie den Löffel zuerst aufnahmen.

Die Einführung eines Elements der nicht deterministischen Beweglichkeit in das Bewegungsspektrum der Fasern erlaubt uns die Schlussfolgerung, dass jede Bewegung zu einem bestimmten Zeitpunkt einzigartig und nicht wiederholbar ist. **Jede Bewegung ist einzigartig** (Abb. Nachwort 3 D und Video Nachwort 1 D).

Die Beweglichkeit der Fibrillenarchitektur ist nicht das Ergebnis eines einzigen prädeterminierten Mechanismus. Im Gegenteil scheint sie eher willkürlich und aus einem großen Repertoire verschiedener möglicher Bewegungen zustande zu kommen. Eine bestimmte Bewegung wird zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgewählt, um eine spezifische, nicht reproduzierbare Aktion hervorzubringen. Diese Unberechenbarkeit erinnert auf erstaunliche Weise an die Ungewissheit der Quantenphysik.[5]

Warum sollte eine unregelmäßige, chaotische, fraktale, nicht lineare Organisation existieren, wenn Ordnung und Linearität sich bereits als effektiv erwiesen haben?

Die westliche Kultur neigt mehr als andere Kulturen dazu, Wert auf Ordnung zu legen. Das gibt uns eine gewisse Sicherheit. Das Prinzip der Kausalität, das sich bis zu den griechischen Philosophen der Antike zurückverfolgen lässt, ist das Fundament dieses Gedankengangs. Kausalität ist die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung, wobei die Wirkung als eine Konsequenz der Ursache verstanden wird.

Es ist schwierig, das sichere Ufer der vorhersehbaren und sicheren Ordnung zu verlassen und in das Meer der chaotischen Unberechenbarkeit einzutauchen. Ich selbst empfand dies aus wissenschaftlicher Sicht als eine große Herausforderung und vollführte diesen konzeptuellen Sprung nur unter Schwierigkeiten.