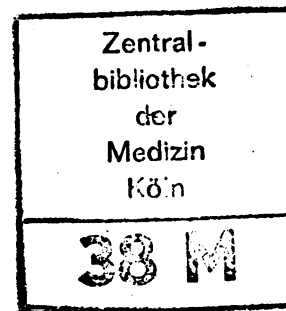


Akz Nr
1986 713-25/307
94:379



Biomechanik des Schultergürtels*

R. Putz

Anatomisches Institut (Lehrstuhl III) der Universität, Albertstraße 17, D-7800 Freiburg i. Br.

The biomechanics of the shoulder girdle

Summary. All parts of the shoulder girdle together form a single compact functional unit, completed on one side by means of the proximal surface of the thorax and on the other by the shoulder joint, which represents the fixed point of the free upper extremity. With the exception of the anchorage provided by a few ligaments to the anterior wall of the chest, the elements of the shoulder girdle are connected medially to the skeletal trunk and laterally to the humerus almost exclusively by strong muscles. This means that in contrast to the lower extremity, the essential posture of the shoulder girdle is determined essentially by the interplay of the musculature. This is emphasised in particular by the fact that the spaces between the muscles and the thorax can be stretched and displaced.

Key words: Shoulder girdle – Humeroscapular joint – New functional aspects.

Zusammenfassung. Alle Anteile des Schultergürtels bilden zusammen eine in sich geschlossene funktionelle Einheit. Sie wird einerseits durch die Auflagefläche des Tho-

rax vervollständigt, andererseits durch das Schultergelenk, das den Fixpunkt der freien oberen Extremität darstellt. Abgesehen von der nur aus wenigen Bändern bestehenden Verankerung an der vorderen Brustwand, werden die Elemente des Schultergürtels mit dem Stammskelett nach medial und dem Humerus nach lateral fast ausschließlich durch kräftige Muskeln verbunden. Dies bedeutet, daß im Gegensatz zur unteren Extremität bereits die Ausgangshaltung des Schultergürtels wesentlich vom Kräftespiel der Muskulatur bestimmt wird. Die ausgedehnten Verschieberäume zwischen den Muskeln und dem Thorax unterstreichen dies besonders.

Schlüsselwörter: Schultergürtel – Humeroscapulargelenk – neue funktionelle Aspekte.

* Herrn Prof. Dr. D. Wittekind, Freiburg i. Br., zum 65. Geburtstag gewidmet

Morphologie des Schultergürtels

Clavicula und Scapula, die beiden Skelettelemente des Schultergürtels, sind nur an einer Stelle gelenkig an das Rumpfskelett fixiert. Das Sternoclaviculargelenk (Art. sternoclavicularis) weist in sich verdrehte (irreguläre) Gelenkflächen auf und ist rundum von einer festen Gelenkkapsel umgeben (Abb. 1). Ein Discus articularis, dessen

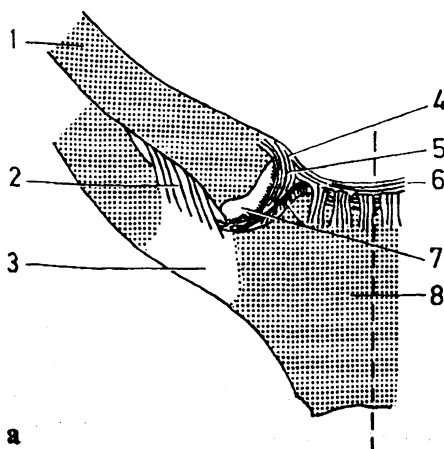
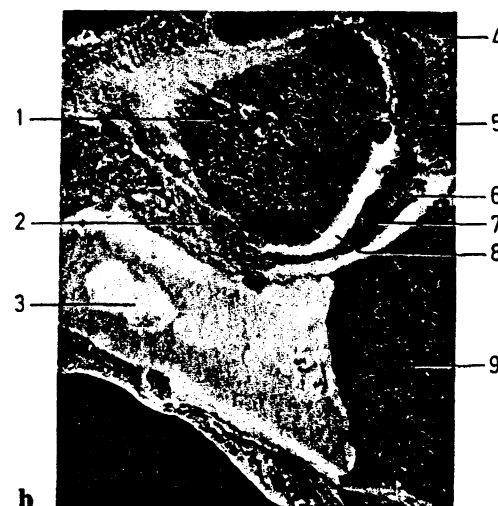


Abb. 1a und b. Sternoclaviculargelenk. a Schematische Darstellung der Bänder und des Discus eines rechten Sternoclaviculargelenkes. b Frontalschnitt durch ein rechtes Sternoclaviculargelenk, Ansicht von vorne. a 1 = Clavicula; 2 = Lig. costoclaviculare; 3 = Synchondrose der 1. Rippe mit dem Brustbein; 4 = Gelenkkapsel; 5 = Discus articularis; 6 = Lig. interclaviculare; 7 = Claviculärer und sternaler Gelenkkörper; 8 = Manubrium sterni. b 1 = Clavicula; 2 = Lig. costoclaviculare; 3 = Synchondrose der 1. Rippe mit dem Brustbein (zentral Verkalkungszone); 4 = Gelenkkapsel und Lig. interclaviculare; 5 = Discus articularis; 6 = Synovialzotte; 7 = Gelenkhöhle; 8 = Claviculärer und sternaler Gelenkkörper; 9 = Manubrium sterni

ZSA
1098



festen Fasern am oberen hinteren Umfang der Clavicula entspringen und zum Unterrand der Incisura clavicularis des Stammes ziehen, teilt es häufig unvollständig in zwei Kammern. Über die Mittellinie hinweg verbindet am Boden der Incisura jugularis sterni das Lig. interclaviculare die medialen Enden der beiden Claviculae. Knapp vor dem Gelenkende der Clavicula zieht schräg nach medial kaudal das sehr feste Lig. costoclaviculare zum Knorpelansatz der 1. Rippe.

Das platte laterale Ende der Clavicula artikuliert mit dem Acromion der Scapula über das Acromioclaviculargelenk (Art. acromioclavicularis), das ebenfalls einen häufig unvollständigen Discus articularis aufweist (Abb. 2). Die Gelenkkapsel dieses Gelenkes ist nicht sehr fest, dennoch besteht kein allzu großer Bewegungsspielraum. Dies ist vor allem auf die Wirkung des Lig. coracoclaviculare, eines besonders starken, in sich verdrehten und zweigeteilten Bandes zurückzuführen, das von der Unterfläche der Clavicula zum Proc. coracoideus zieht und als weitere Sicherung dieses Gelenkes dient.

Beide Schlüsselbeingelenke sind ohne Rücksicht auf die Form ihrer Gelenkkörper von ihrer Funktion her als Kugelgelenke aufzufassen. In Anbetracht der festen Bänder besitzen sie einen erstaunlich großen Bewegungsraum [8]. Für sich alleine kommt die große Beweglichkeit der Gelenke des Schultergürtels selten zum Ausdruck, sie werden jedoch bei nahezu allen Bewegungen der freien oberen Extremität über die Muskelketten kraftschlüssig mitbewegt.

Während der vordere Anteil des Schultergürtels über das innere Schlüsselbeingelenk sicher geführt werden kann, wird die Scapula breitflächig von den Rippen abgestützt. Ihre genaue Position wird von den oberflächlichen Rückenmuskeln je nach den über das Schultergelenk auf den Schultergürtel wirkenden Kräften eingestellt. Die flachkonkave dreieckige Knochenplatte der Scapula wird von zwei Muskeln unterfüttert. Dem Knochen selbst liegt der M. subscapularis an; vom Margo medialis (vertebralis) der Scapula zieht zwischen den genannten Muskeln und der Thoraxwand der M. serratus anterior mit neun Zacken zur Knorpel-Knochengrenze der 1. bis 8. Rippe. Auf diese Weise entstehen zwischen Scapula und Thoraxwand zwei voneinander völlig getrennte, mit lockerem Bindegewebe erfüllte Verschieberäume, die, mechanisch betrachtet, die Beweglichkeit eines Gelenkes mit drei Freiheitsgraden (Kugelgelenk) aufweisen. Diese Freiheitsgrade sind longitudinale und transversale Verschiebung (Translationen), sowie Drehung (Rotation) um eine senkrecht zur Platte der Scapula stehende Achse.

Clavicula und Scapula stehen jeweils in einem Winkel von ca. 60° zueinander wie auch zur Sagittalebene. Aus dieser definierten „Scapularebene“ wird die Scapula bei vielen Positionsänderungen des Schultergürtels mehr oder weniger herausgekippt. Einen Extremfall stellt die „Scapula alata“ bei Lähmungen des M. serratus anterior oder der Mm. rhomboidei dar.

Im Normalfall kann sich die Scapula etwa um 20 cm auf der Thoraxwand nach lateral, 5 cm nach medial und um jeweils 15 cm nach oben und unten verschieben. Schon an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß bei einer Abduktion des Humerus bereits ab 30° eine Mitbewegung der Scapula im Sinne einer Rotation des Angulus inferior nach lateral stattfindet.

Morphologie des Schultergelenks und der periartikulären Strukturen

Dem Caput humeri mit seiner ca. 24 cm² großen Oberfläche steht die Gelenkfläche der Cavitas glenoidalis mit etwa 6 cm² gegenüber. Die beiden Gelenkkörper sind nicht ganz kongruent, was im Transversalschnitt besonders gut zur Darstellung kommt (Abb. 2a, b). Ihre hyalinen Knorpelauflagerungen sind ungleichmäßig dick. Am Humeruskopf besitzt der Knorpel seine dickste Stelle im Bereich seiner Kontaktfläche in O-Stellung (Adduktion) mit ca. 2 mm. Die Schulterpfanne dagegen ist in ihrem Zentrum mit einer dünnen Knorpelauflagerung ausgestattet, die gegen die Ränder hin deutlich dicker wird. Zusätzlich ist sie vom Labrum glenoidale (Limbus) umgeben, das vorwiegend aus kollagenen Fasern aufgebaut ist. Damit ist das Labrum glenoidale nicht einfach als Vergrößerung der Gelenkfläche anzusehen, sondern dient als Widerlager gegen die bei größeren Gelenkdrücken auftretenden beträchtlichen Querdehnungen des Gelenkknorpels [12]. An der Basis des im Querschnitt dreieckigen Labrum glenoidale verläuft zirkulär ein Arterienring, von dem aus die Versorgung gewährleistet wird.

Unter Einschluß des Tuberculum supraglenoidale, an dem die Sehne des Caput longum des M. biceps brachii entspringt, umgibt die Gelenkkapsel den äußeren Umfang des Labrum glenoidale. Sie zieht als weiter schlaffer Sack zur Knorpel-Knochengrenze des Caput humeri (Collum anatomicum), nur die beiden oberen Facetten der Tubercula liegen innerhalb des Gelenkraumes. Im Gegensatz zu häufigen Feststellungen in der Literatur (z. B. [11]) können anatomisch kaum nennenswerte ligamentäre Verstärkungen der Membrana fibrosa gefunden werden. Arthroskopisch stellen sich häufig Falten zum Innenraum des Gelenkes hin dar, die aber nur durch die Parallelverschiebung der Gelenkkapsel im Zuge der Arthroskopie zustande kommen.

Neben dem Recessus axillaris, der eigentlich eine nur in O-Stellung vorhandene Reservefalte darstellt, kommunizieren regelmäßig die Bursa m. subscapularis und die Bursa m. coracobrachialis. An anatomischen Präparaten älterer Menschen findet man auch Verbindungen zu einer Bursa m. infraspinati und m. supraspinati.

Es würde den vorgegebenen Rahmen überschreiten, auf die Systematik der auf das Schultergelenk wirkenden Muskeln einzugehen. Für das Verständnis der Kräftewirkungen im Schultergelenk ist es jedoch notwendig, sich die Verläufe (Wirkungslinien) der gelenknahen Muskeln in bezug der Abduktionsachse vor Augen zu halten

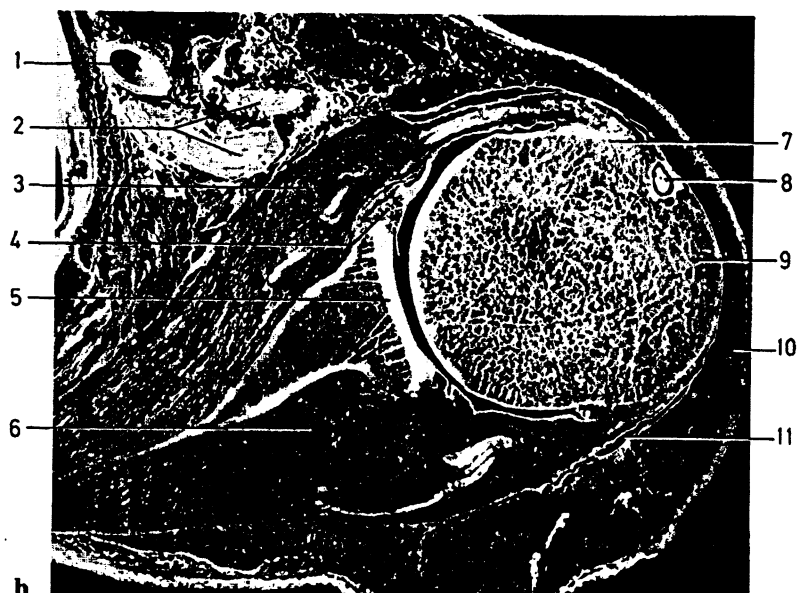


Abb. 2a und b. Schultergelenk. a Schnitt in der Scapularebene. b Transversalschnitt. a 1 = Clavicula; 2 = Cavitas glenoidalis mit Labrum glenoidale; 3 = M. infraspinatus; 4 = Art. acromioclavicularis mit Discus articularis; 5 = Bursa subacromialis; 6 = Sehne des M. supraspinatus; 7 = Bursa subdeltoidea; 8 = M. teres minor; 9 = M. deltoideus. b 1 = A. axillaris; 2 = Plexus brachialis; 3 = M. subscapularis; 4 = Labrum glenoidale; 5 = Cavitas glenoidalis; 6 = M. infraspinatus; 7 = Tuberculum minus; 8 = Sehne des M. biceps brachii (Caput longum); 9 = Tuberculum majus; 10 = M. deltoideus; 11 = Bursa subdeltoidea

(Abb. 3 und 4). Eine Gruppe von Muskeln zieht lateral über diese Achse hinweg (M. deltoideus-Pars acromialis, M. supraspinatus, die obersten Anteile der Mm. infraspinatus und subscapularis), während die andere Gruppe medial der sagittalen Gelenkachse verläuft (M. deltoideus – Pp. spinalis und clavicularis, die unteren Anteile der Mm. infraspinatus und subscapularis, M. teres minor, M. teres major). Da die meisten der genannten Muskeln im engeren Gelenkbereich ziemlich breit sind, muß davon ausgegangen werden, daß sie ihre Wirkungsqualität im Bewegungsablauf auf Grund ihrer Lageänderung

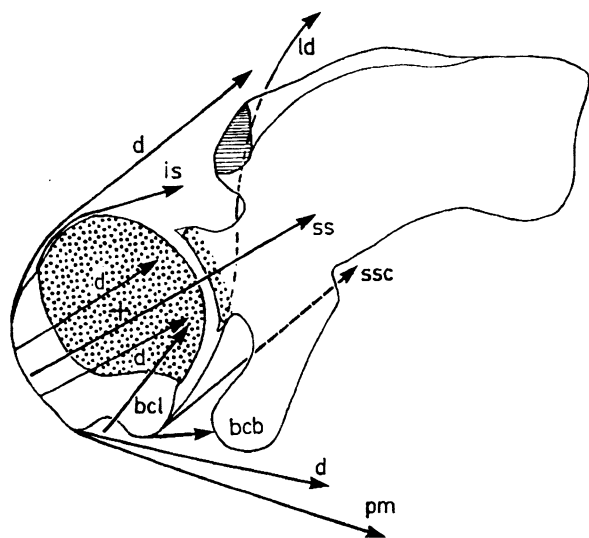


Abb. 3. Schematischer Transversalschnitt durch das Schultergelenk mit den Wirkungslinien der wichtigsten Schultergelenksmuskeln. bpb M. biceps brachii Caput breve) und M. coracobrachialis; bcl M. biceps brachii (Caput longum); d M. deltoideus; is M. infraspinatus und M. teres minor; ld M. latissimus dorsi und M. teres major; pm M. pectoralis major; ss M. supraspinatus; ssc M. subscapularis

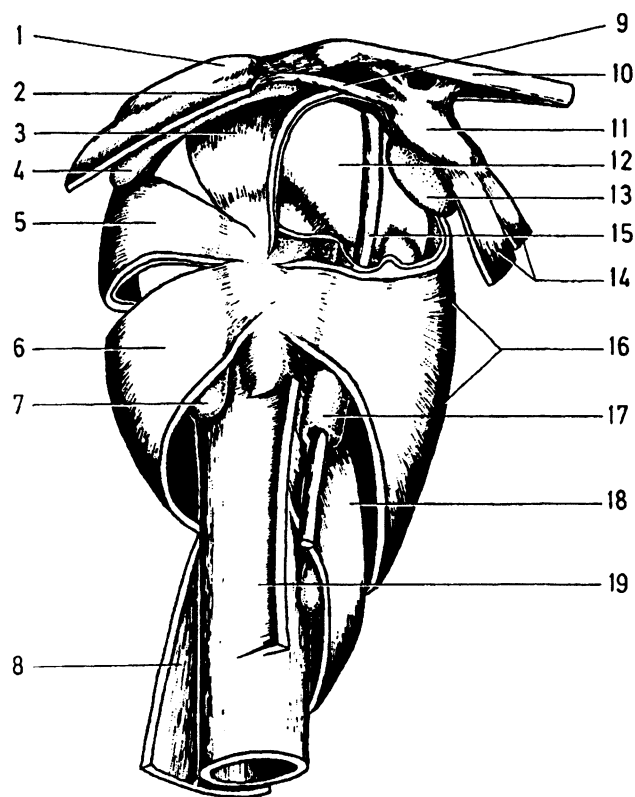


Abb. 4. Muskeln des Schultergelenks von lateral. Die nicht durch die Muskeln der „Rotatorenmanschette“ verstärkten Anteile der Gelenkkapsel sind ausgeschnitten. 1 = Acromion; 2 = M. deltoideus Pars acromialis; 3 = M. supraspinatus; 4 = Bursa subacromialis; 5 = M. infraspinatus; 6 = M. teres minor; 7 = Bursa m. infraspinati; 8 = M. triceps brachii; 9 = Lig. coracoacromiale; 10 = Clavicula; 11 = Proc. coracoideus; 12 = Caput humeri; 13 = Bursa m. coracobrachialis; 14 = M. biceps brachii (Caput breve) M. coracobrachialis; 15 = M. biceps brachii (Caput longum); 16 = M. subscapularis; 17 = Vagina synovialis intertubercularis; 18 = M. latissimus dorsi; 19 = M. pectoralis major

zur jeweiligen Bewegungsachse ändern. Dem wird durch Anpassung der Innervation im Bewegungsablauf Rechnung getragen.

Die Muskeln, deren Sehnen am Tuberculum majus und Tuberculum minus (bzw. deren Cristae) inserieren, werden als Rotatoren bezeichnet. Die sogenannte „Rotatoren-Manschette“, die eher der Form einer Kappe ähnelt, entsteht aus der Verflechtung der Sehnen zu einer Platte, die zum Teil mit der Gelenkkapsel verschmolzen ist. Aufgrund des großen Durchmessers des Humeruskopfes (etwa 6 cm) besitzen die Rotatoren ein beträchtliches Drehmoment (Abb. 3).

Das Mißverhältnis der Gelenkflächen und die Schlaffheit der Gelenkkapsel, die eine passive Entfernung der beiden Gelenkkörper bis zu 2 cm am Präparat ermöglicht, unterstreichen die Bedeutung der Muskulatur für die Stabilisierung des Schultergelenks. Sowohl bei extremer Krafteinwirkung als auch bei gestörtem Zusammenspiel der Muskulatur kann der „Fornix humeri“ als einzige passive Sicherung gegen eine Translation nach kranial angesehen werden. Unter „Fornix humeri“ versteht man den dachförmigen Vorsprung über dem Schultergelenk, der vom Acromion, dem Proc. coracoideus und dem beide Fortsätze verbindenden Lig. coracoacromiale gebildet wird. Wichtiger als eine passive Sicherung ist die Bedeutung der genannten Knochenvorsprünge als weit ausladende Muskelbefestigungen, was man besonders an ihrer Spongiosastruktur erkennen kann. Tichy et al. [15] haben sowohl im Acromion als auch im Proc. coracoideus in den vertikalen Ebenen ihrer Längsausdehnung deutliche Spitzbogenmuster entdeckt, was darauf hinweist, daß beide Vorsprünge an starke Biegebeanspruchungen in diesen Ebenen angepaßt sind.

Das Lig. coracoacromiale, das als dreieckige Platte von der Unterfläche des Acromions zur dorsalen Fläche des Proc. coracoideus zieht, scheint nach den vorliegenden Untersuchungen von Putz et al. [13], sowie Wasmer et al. [17] eine Zuggurtungsfunktion für beide Fortsätze, besonders aber für das Acromion, zu besitzen. Messungen des Biegeverhaltens bei unterschiedlicher Belastung haben den Hinweis erbracht, daß das Band bei starker Muskelanspannung in den Extremstellungen der Retroversion vor allem eine wesentliche Entlastung des Acromions bewirkt.

Zwischen dem Fornix humeri einerseits und dem von der Gelenkkapsel bedeckten Caput humeri sowie den Tubercula andererseits breitet sich die ausgedehnte Bursa subacromialis aus. Durch ihre Formänderung ermöglicht sie die ausgedehnte Verschiebung des Humerus gegenüber dem Acromion, wie sie bei vielen Bewegungen im Schultergelenk notwendig ist. Darüber hinaus gibt es Hinweise [1, 3, 6, 13, 17], daß beim älteren Menschen offensichtlich als Ausdruck zunehmenden Druckes auf die Unterfläche des acromialen Bandansatzes Knorpelablagerungen auftreten. Außerdem liegen Beobachtungen vor, daß das Lig. coracoacromiale mit zunehmendem Alter an Masse und Festigkeit abnimmt [17].

Klinisch-anatomisch ist die Engstellensituation der Sehne des M. supraspinatus unterhalb des Lig. coracoacromiale von besonderer Bedeutung. Dieser Muskel entspringt in der Fossa supraspinata, seine Sehne zieht über das Caput humeri bis zur oberen Facette des Tuberculum majus. Unter noch immer nicht ganz geklärten Umständen kommt es zu Friktionen der Muskelsehne am Fornix humeri, die auf lange Sicht bis zur Zerreißung der Sehne führen können [2].

Mechanische Aspekte des Schultergürtels

Stark vereinfachend dargestellt, sind Clavicula und Scapula Interponate, die die Lateralisierung der Schulter garantieren. In aufrechter Haltung und bei adduziertem Arm wird das Gewicht der oberen Extremität durch diese beiden Knochen abgestützt. Dem M. trapezius fällt dabei die Aufgabe zu, den Schultergürtel nach cranial zu fixieren. Die Clavicula überträgt einen Anteil nach zentral gerichteter Kraft direkt auf das Sternoclaviculargelenk. Die Einleitung der Kraft auf die Clavicula erfolgt zum Teil über das Acromioclaviculargelenk, zum Teil über das Lig. coracoacromiale. Die Scapula ist dagegen in einem komplizierten Schlingensystem der oberflächlichen Rückenmuskeln aufgehängt. Zusätzlich erfolgt eine breite Abstützung über die scapulo-thoracale Gleitfläche.

Mit zunehmender Abduktion nehmen die Kräfte, die von Scapula und Clavicula auf den Thorax übertragen werden, zu. Für die in Abb. 5a dargestellte Abduktionsstellung verläuft die resultierende Druckkraft sowohl durch das Schulter- als auch durch das Sternoclaviculargelenk. Abb. 5b soll die Art der Druckübertragung des Armgewichtes auf den Thorax in Abduktionsstellung verdeutlichen, insbesondere die Bedeutung der scapulo-thoracalen Gleitfläche, die eine Druckübertragung in verschiedensten Stellungen ermöglicht. Besonders muß darauf hingewiesen werden, daß eine ziemlich gleichmäßige Aufteilung der durch das Armgewicht auf den Schultergürtel wirkenden Kraft (F_D) nur dann gegeben sein kann, wenn diese Krafteinwirkung in der Frontalebene erfolgt. Bei Abweichen aus der Frontalebene in verschiedenen Körperhaltungen werden Scapula und Clavicula in höchst unterschiedlicher Weise in die Druckübertragung einbezogen. Aufgrund der flexiblen Aufhängung der Scapula in Muskelschlingen kann eine gewisse Anpassung im Sinne einer besseren Druckübertragung erfolgen. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß die multidirektionale Aufhängung der Scapula und die daraus mögliche großräumige Verschieblichkeit der Scapula auf dem Thorax nicht nur vom kinematischen Standpunkt aus betrachtet werden darf, sondern auch wesentliche statische Aspekte besitzt. Die Mitbewegung der Scapula bei vielen Armaktionen gibt damit einerseits den „Fornix humeri“ für die Erweiterung des Aktionsradius nach oben frei, andererseits ermöglicht sie eine optimale Druckübertragung der bei abduziertem Arm erhöhten Druckkräfte auf den Thorax. Die Faseranordnung

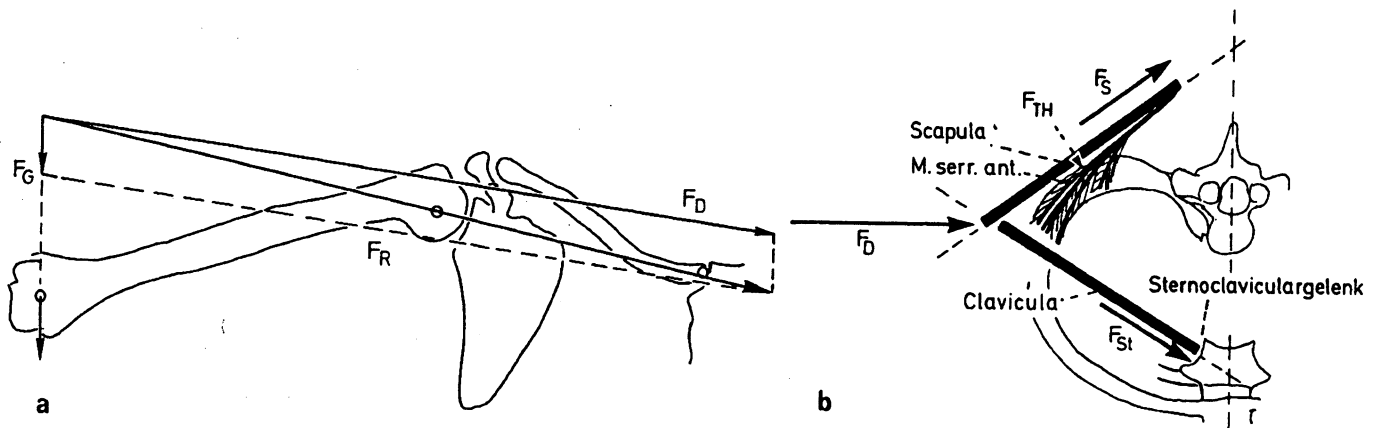


Abb. 5a und b. Kräfteverhältnisse des Schultergürtels. a Kräfte im Schultergelenk und Sternoclaviculargelenk in Abduktionsstellung. b Kraftübertragung auf den Thorax. F_D Kraftkomponente der Abduktoren; F_G Kraft des Armgewichtes; F_R Resultierende Druckkraft im Schultergelenk und Sternoclaviculargelenk; F_S Druckkraft auf die Scapula; F_{ST} Druckkraft im Sternoclaviculargelenk; F_{TH} Druckwirkung auf die scapulothorakale Gleitfläche

der Gelenkkapsel, des Discus und der periartikulären Bänder (Abb. 1) weist darauf hin, daß die Clavicula ebenso in der Lage ist, starke Zugkräfte aufzunehmen. Solche treten beim Zurückführen der Schulter auf oder z. B. beim Hängen am Reck.

Mechanische Aspekte des Schultergelenks

Das Schultergelenk benötigt zur Aufrechterhaltung des Flächenkontaktes keine Bänder. Die Sicherung des Gelenkes, d. h. die Gewährleistung der auf Dauer materialgerechten Art der Druckübertragung im Gelenk, wird ausschließlich von den um das Gelenk angeordneten Muskeln besorgt.

Aufgrund des nach abwärts gerichteten Armgewichtes und der entgegengesetzt wirkenden Ab- und Adduktionsmuskeln entsteht auch in O-Stellung im aufrechten Stand eine gegen das Zentrum der Cavitas glenoidalis gerichtete resultierende Druckkraft. Der Tonus der stark ausgeprägten Schultermuskulatur genügt bereits zur Aufrechterhaltung dieses Zustandes. Eine erhöhte Muskelaktion wird notwendig, sobald der Arm im Schultergelenk abduziert wird. Durch den damit zunehmenden Hebelarm des Armgewichtes entsteht ein sehr rasch zunehmendes Drehmoment, das nur durch eine starke Erhöhung der Muskelkraft im Gleichgewicht gehalten werden kann (Abb. 5a und 6a). Aufgrund des ungleichen Verhältnisses der Hebelarme und der Tatsache, daß die Cavitas glenoidalis relativ flach ist, treten zusätzliche Kräfte im Sinne einer Verschiebung des Humeruskopfes auf der Fläche der Cavitas glenoidalis nach cranial hin auf. Ohne massiven Gegenzug nach unten würde der Humeruskopf bei der Abduktionsbewegung gegen den Fornix humeri gedrückt. Diese Cranialverschiebung wird nach Koydl et al. [6] von einem kleinen Cavitas-Spina-Winkel, der kleiner als $80,5^\circ$ ist, begünstigt (Abb. 6b).

Tatsächlich findet man bei der histologischen Untersuchung von Fornix-Anteilen bei Patienten mit „Supraspinatus-Syndrom“, daß an der Unterseite des Acro-

mions und des ansatznahen Bereiches des Lig. coracoacromiale Knorpelmetaplasien auftreten. Die unterhalb der sagittalen Gelenkachse verlaufenden Anteile der Muskeln der sogenannten Rotatorenmanschette erfüllen demnach die außerordentlich wichtige Aufgabe der „Balancierung“ des Humeruskopfes in der Cavitas glenoidalis. Geringfügige Störungen dieses komplizierten Bewe-

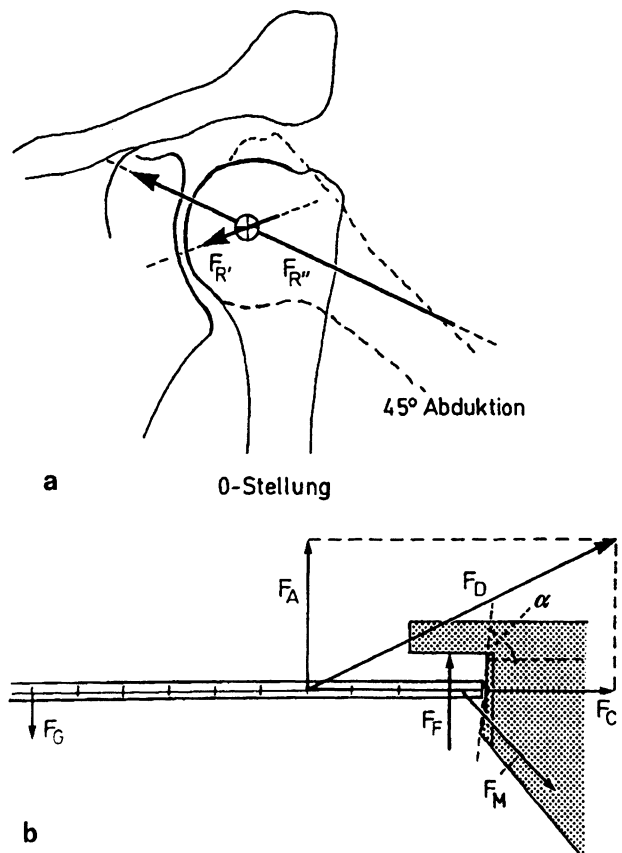


Abb. 6a und b. Der Arm als Hebel. a Änderung der resultierenden Druckkraft im Ablauf der Abduktion. b Entlastung des Fornix humeri durch die Muskeln der Rotatorenmanschette. F_A Abduktionskräfte; F_C Zentrische Druckkraft auf die Cavitas glenoidalis, F_G Kraft des Armgewichtes; F_F Gegen den Fornix humeri gerichtete Druckkraft; F_M Entlastungskräfte für den Fornix humeri durch die unteren Anteile der Muskeln der Rotatorenmanschette; $F_{R'}$ O-Stellung; $F_{R''}$ 45° Abduktion

gungsmusters müssen beträchtliche Auswirkungen auf das Gesamtgelenk haben. Spannungsoptische Untersuchungen sowie Prüfungen der Materialverteilung im subchondralen Knochen der Cavitas glenoidalis durch Tillman [16] bestätigen zwar die Annahme, daß die Cavitas glenoidalis in erster Linie zentrisch auf Druck beansprucht wird, die Materialverteilung deutet jedoch auf eine höhere Beanspruchung im oberen Gelenkanteil hin.

Von verschiedenen Autoren liegen Angaben über die im Schultergelenk wirkende Anpreßkraft vor. Nach Bodem et al. [1] ist davon auszugehen, daß im allgemeinen nur Werte bis zur Größe des Körpergewichtes erreicht werden. Eigene Berechnungen für den horizontal abduzierten Arm ergaben Werte von ca. 3,5 kp pro cm².

Im Transversalschnitt (Abb. 1b) wird besonders deutlich, daß die Cavitas glenoidalis jeweils nach ventral und dorsal konsolenartige Ursprünge ausbildet. Sie sind von festen, senkrecht zur Gelenkoberfläche eingestellten Spongiosabälkchen, die quere Verstrebungen aufweisen, unterfüttert. Die Dicke des Gelenkknorpels nimmt außerdem gegen den ventralen und dorsalen Rand hin zu. Daraus ist abzuleiten, daß in den Endphasen bei der Innen- und Außenrotation eine besonders hohe Beanspruchung dieser Zonen auftritt. Da die Krümmungen von Kopf und Pfanne in der Transversalebene nicht übereinstimmen – die Cavitas glenoidalis ist etwas flacher –, wird dadurch die Auffassung von Kapandji [5] sehr gestützt, der bei der Rotation von einem Rollgleitmechanismus im Schultergelenk ausgeht. Nach dieser Auffassung rollt der Humeruskopf in der Gelenkpfanne von der O-Stellung aus zuerst einige wenige Grade um eine instantane Longitudinalachse nach vorne bzw. nach hinten ab, eine Bewegung, die bei weiter fortschreitender Rotation in eine Drehbewegung mit ziemlich konstanter Achse übergeht.

Während die Ab- bzw. Adduktion und die Rotation relativ gut in ihrer Gelenkmechanik zu interpretieren sind, gestaltet sich dies bei der Ante- und Retroversion um einiges schwieriger. In ihrer häufigsten Anwendung, z. B. als Ausschwingbewegungen beim Gehen, finden sie nicht um eine strenge transversale, sondern um eine nach der Scapularebene ausgerichteten Achse statt, was man bei der Beobachtung von Straßenpassanten leicht bestätigen kann.

Für jede einzelne Ante- oder Retroversionsstellung gelten im Prinzip ebenfalls die Bedingungen der Abb. 6a, b. Der Humeruskopf wird unter normalen Verhältnissen auch bei Bewegungen in der Sagittalebene nicht gegen den „Fornix humeri“ abgestützt, sondern durch die an der Bewegung oder Aufrechterhaltung einer bestimmten Stellung beteiligten, auf den ersten Blick antagonistisch wirkenden Muskeln in „Balance“ gehalten, so daß die resultierende Druckkraft ungefähr zentrisch die Cavitas glenoidalis trifft. Allerdings können bereits geringgradige Veränderungen der Vorder- oder der Hinterkante der Cavitas glenoidalis zu schwerwiegenden Störungen, wie z. B. einer habituellen Luxation, führen. Sowohl diese klinische Erfahrung als auch das anatomische

Bild (Abb. 2b) heben die Bedeutung des Vorder- bzw. Hinterrandes der Cavitas glenoidalis für die Druckübertragung im Schultergelenk hervor.

Unter Bezug auf die Abbildung 5b sei nochmals darauf hingewiesen, daß die beiden Anteile des Schultergürtels (Clavicula und Scapula) in Ante- und Retroversionsstellung in unterschiedlichem Ausmaß belastet werden. In Anteversionsstellung erfolgt die Druckübertragung auf den Thorax vornehmlich über die Clavicula und ihre Gelenke, während sie in Retroversionsstellung direkt über die scapulo-thoracalen Gleitflächen und die oben angeführten Muskelschlingen aufgenommen wird.

Die Rolle der Bursa subacromialis

Die zwischen dem Fornix humeri und dem von der Gelenkkapsel bedeckten Humeruskopf weit ausgedehnte Bursa subacromialis ist für die normale Funktion des Schultergelenkes von besonderer Bedeutung. Aufgrund der ausgedehnten Flächenbewegungen der beiden genannten Strukturen gegeneinander wird sie bei vielen Bewegungen sehr stark verformt, was von vielen Autoren ausführlich beschrieben wurde [8, 15]. Abgesehen von besonderen Armhaltungen, wie z. B. Abstützen des Oberkörpergewichtes auf den Ellbogen, erfolgt über die Bursa acromialis keine Druckübertragung auf den Fornix humeri. Sollte allerdings das Innervationsmuster der gelenknahen Muskeln gestört und die „Balance“ des Caput humeri in der Cavitas glenoidalis nicht gesichert sein, so kann eine pathologische Druckwirkung auf den Fornix humeri durch das Caput humeri entstehen.

Die Armelevation

Die Hebung des Armes über die Horizontale erfordert das Zusammenspiel der Muskeln des Schultergelenkes mit denen des Schultergürtels. Die elektromyographischen Untersuchungen von Laumann [9] ergaben, daß die Elevation in erster Linie von der Aktivität des M. serratus anterior abhängt. Sie zeigen, daß im Verlauf der Abduktion und Elevation des M. deltoideus von 0–30° die Mm. supra- und infraspinatus sowie die oberen Anteile der Mm. trapezius und serratus anterior beteiligt sind. In einer zweiten Phase bis 120° erfahren nach diesen Untersuchungen alle beteiligten Muskeln einen annähernd linearen Aktivitätszuwachs. Bis 180°, der Hebung des Armes bis in eine longitudinale Körperachse, steigern nur mehr der M. deltoideus und der M. serratus anterior ihre Aktivität. Aus den zitierten Untersuchungen läßt sich besonders gut die Steuerung der Mitbewegung der Scapula im Ablauf der Abduktion und Elevation verfolgen. Außerdem wird deutlich, daß der Ausfall eines einzelnen Hauptmuskels (von Laumann als „essentielle Muskeln“ benannt) von den übrigen an der Bewegung beteiligten Muskeln noch kompensiert werden kann.

Literatur

1. Bodem F, Brussatis B, Menke W (1985) Zur theoretischen Biomechanik des Schultergelenks: Die Entstehung gewöhnlicher und außergewöhnlicher Belastungen des glenohumeralen Gelenkknorpels. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 82–87
2. Eulert J, Apoil A, Dautry P (1981) Zur Pathogenese und operativen Behandlung der sogenannten Periarthritis humeroscapularis. *Z Orthop* 119:25–30
3. Hille E, Roggenland G, Schulitz KP, Döhning S (1985) Der subacromiale Raum des Schultergelenkes – eine experimentelle Studie. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 66–70
4. Inman VT, Saunders JBM, Abott LC (1944) Observations on the function of the shoulder joint. *J Bone Joint Surg [Am]*26:1–8
5. Kapandji A (1984) Funktionelle Anatomie der Gelenke. Bücherei des Orthopäden, Bd 40. Enke, Stuttgart
6. Koydl P, Ernst H (1985) Druckkräfte am Schulterdach bei der Armabduktion – eine experimentelle Studie. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 93–97
7. Kummer B (1976) Anatomie und Biomechanik der Schulter. *Hefte Unfallheilkd* 126:5–19
8. Lanz T v, Wachsmuth W (1959) *Arm. Praktische Anatomie*, Bd I/3, 2. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York
9. Laumann U (1985) Elektromyographische und stereofotogrammetrische Untersuchungen zur Funktion des Schulter-Armkomplexes. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 126–131
10. Münch EO, Lobenhoffer P, Wirth CJ, Bergmann M (1985) Das Spannungsverhalten der Bandverbindungen der Schlüsselbeingelenke. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 7–12
11. Neumann K, Lies A, Muhr G (1985) Die Schulterarthroskopie – eine relevante diagnostische Ergänzung –. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 147–151
12. Pauwels F (1965) *Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates*. Springer, Berlin Heidelberg New York
13. Putz R (1985) Anatomie und Biomechanik des Schultergelenks. *Therapiewoche* 35:308–314
14. Putz R, Reichelt A, Liebermann J, Eichhorn M v (1985) Mechanische Beanspruchung des Proc. coracoideus unter verschiedenen Versuchsbedingungen. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 114–117
15. Tichy P, Tillmann B, Schleicher A (1985) Funktionelle Beanspruchung des Fornix humeri. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 88–92
16. Tillmann B (1984) Biomechanik des Schultergelenks und der periartikulären Gewebe. *Buchreihe für Orthopädie und Orthopädische Grenzgebiete* 8:11–18
17. Wasmer G, Hagena FW, Bergmann M, Mittelmeier TH (1985) Anatomische und biomechanische Untersuchungen des Ligamentum coracoacromiale am Menschen. In: Refior HJ, Plitz W, Jäger M, Hackenbroch MH (Hrsg) Biomechanik der gesunden und kranken Schulter. Thieme, Stuttgart, S 61–65