

Physik und Medizin

# DREHMOMENTE

Teil 2

## Belastung der Wirbelsäule

Lehrstuhl für Didaktik der Physik  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Giuseppe Colicchia, Andrea Künzl und Hartmut Wiesner

# ***Physikalisches und medizinisches Hintergrundwissen zur Belastung der Wirbelsäule***

## **Physikalisch-anatomisches Hintergrundwissen**

Wegen der Schwerkraft entstehen im Körper Drehmomente, die vom Drehpunkt und der Massenverteilung abhängen.

Der Schwerpunkt eines Körpers ändert sich je nach Lage, die der Körper einnimmt. Bei einem Mensch in aufrechter Position liegt der gesamte Körperschwerpunkt ungefähr auf Höhe des Nabels. Beugt man die Beine oder hebt man die Arme über den Kopf, dann verschiebt sich der Schwerpunkt.

Um das Gleichgewicht beim Stehen zu gewährleisten muss das Lot des Körperschwerpunkts in die Standfläche fallen. Wie der ganze Körper auf seiner Unterstütsungsfläche, so muss jeder einzelne Körperteil auf dem ihn tragenden Gelenk im Gleichgewicht sein. Für die Stabilisierung kommen neben passiven Bändern, die durch eine Limitierung der Beweglichkeit stabilisierend wirken, seitliche aktive Muskeln hinzu.

Im Interesse einer möglichst kleinen Belastung sollte das Lot jedes Körperteilschwerpunkts, inklusive von getragenen Gewichten, genau über dem Gelenk liegen bzw. ihm möglichst nahe sein, um die Beanspruchung zu reduzieren.

Knochen, Bänder und Gelenke stellen den passiven Bewegungsapparat dar. Zahlreiche Einzelmuskeln bewegen die Skelettelemente und stellen den aktiven Bewegungsapparat dar.

## **Die Wirbelsäule und ihre Funktion**

Die Wirbelsäule besteht aus 33-34 knöchernen Segmenten (Wirbeln), die in geordneter Weise eines über dem anderen liegen. Die oberen 24 sind frei beweglich. Zwischen zwei frei beweglichen Wirbeln liegt eine Zwischenwirbelscheibe (Bandscheibe). Sie bildet eine Art Wasserkissen, das als Stoßdämpfer dient. Außerdem wird der Druck auf Grund des „hydraulischen Systems“ gleichmäßig auf ihre Gesamtfläche und damit auf den ganzen Wirbelquerschnitt verteilt. Unter Belastung werden die Bandscheiben ausgepreßt, Flüssigkeit wird abgegeben und die Höhe der Bandscheibe nimmt etwas ab. Im entlasteten Zustand, z. B. in der Nacht, saugen die Bandscheiben Flüssigkeit auf und schwellen etwas an (Bild 1), am Morgen ist man daher etwas größer (das gleiche würde im All unter Schwerelosigkeit passieren). Dieses Zusammenspiel von Zusammenpressen und Ausweiten durch die Änderung in der Belastung hat nicht nur eine mechanische, sondern auch eine wichtige Bedeutung für den Stoffwechsel in der Bandscheibe.

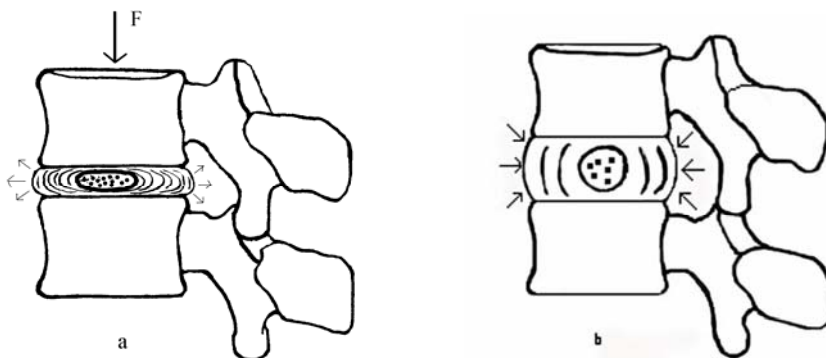


Bild 1 Unter Belastung ( $F$ ) verliert die Bandscheibe Flüssigkeit und ihre Höhe wird kleiner (a). Bei Entlastung wird Flüssigkeit aufgenommen und die Höhe der Bandscheibe wird wieder größer (b).

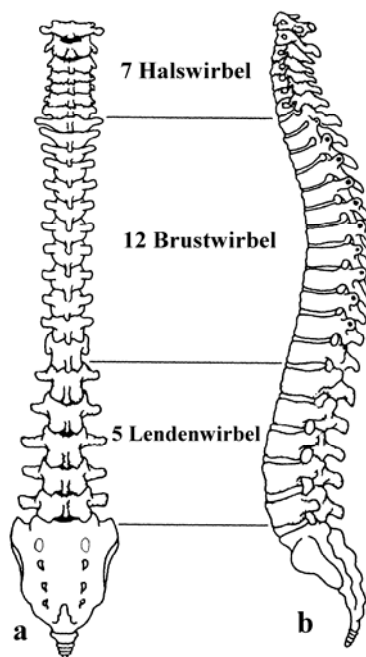


Bild 2: Wirbelsäule (a) von vorn und von der Seite (b) gesehen.

Die Wirbelsäule ist von vorn gesehen eine gerade Säule, in der Seitenansicht ist sie doppelt S-förmig (Bild 2). Ihre Hauptfunktion besteht darin, den aufrechten Oberkörper gegen die Schwerkraft zu halten, damit er nicht umfällt. Mit der Aufrichtung über das Becken trägt sie Kopf, Schultern und obere Gliedmaßen, den Brustkorb und das Abdomen (Unterleib) und überträgt deren Gewicht auf das Becken. Neben der Schutzfunktion für Rückenmark und die zugehörigen Spinalnerven gibt die Wirbelsäule auch den inneren Organen bzw. Eingeweiden von Brust- und Bauchraum Halt.

Die Wirbelsäulenbiegungen dienen der zusätzlichen Stoßdämpfung bzw. Federung des Kopfes und Rumpfes, sie vergrößern die Flexibilität und bieten eine ausbalancierte Stabilität. Bei Fehlhaltungen kann die Wirbelsäule zu flach oder ihre Krümmungen zu stark ausgeprägt sein. Eine gerade Wirbelsäule ist relativ steif und die Stöße könnten bei wechselnder Belastung (beim Springen, Gehen usw.) zu hart sein. In einer zu stark gebogenen Wirbelsäule könnten in den Krümmungen starke Biegekräfte auftreten, die frühzeitig zu

Schmerzen und Schäden wegen Überbeanspruchung führen könnten.

Zu hohe, sowie zu lang andauernde Belastungen und Überbeanspruchungen können Schäden auch der gesunden Strukturen verursachen. Wegen der enormen Flexibilität der Beanspruchungsgrenze (Anpassungsmöglichkeiten) ist es schwierig zu sagen, was „zu hoch“ ist. Ein Beispielwert: Eine unbeschädigte Bandscheibe von Jugendlichen kann einem Druck der Größenordnung von  $10^3$  kPa standhalten [Betz (1998)].

Um die Wirkung einer Belastung besser zu verstehen, betrachten wir eine vertikale Belastung, wobei aber die Wirbelsäule nach vorne gebeugt ist (Bild 3).

Die Kraft  $F$  (Belastung) kann in zwei Komponenten zerlegt werden. Eine Längskomponente  $F_L$ , die den Wirbelkörper axial belastet und eine Schubkomponente  $F_S$ , die den Wirbelkörper vorwärts schiebt [Rauber (1978);Weineck (1984)]. Die Komponente  $F_L$  wird von der Bandscheibe, die Komponente  $F_S$  von Muskeln, Bändern und von der Gelenkfacette (P) aufgehoben, dabei kann eine Überbeanspruchung als extreme Folge zu einem Bruch führen.

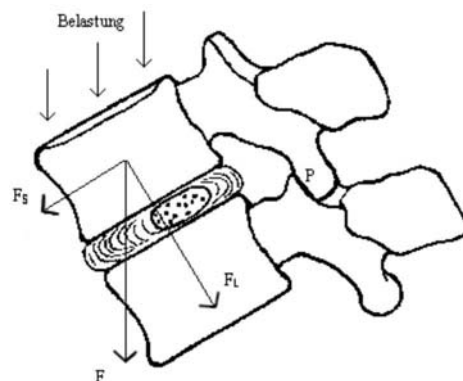
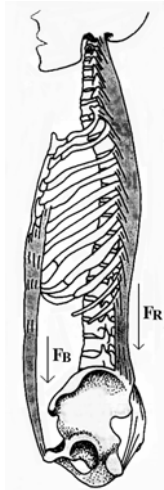


Bild 3: Die vertikale Belastung (Kraft  $F$ ) produziert auf einer gebeugten Wirbelsäule sowohl durch die Kraft  $F_L$  eine axiale Komprimierung der Bandscheibe als auch durch die Kraft  $F_S$  eine Verschiebung des Wirbels nach vorn.

Eine Überbeanspruchung hängt nicht nur von der gesamten Belastung ab, sondern auch von dem Druck auf eine einzige Stelle am Knochen oder in einem Gelenk, wobei eine

Spannungsspitze die Elastizitätsgrenze des Gewebes überschreiten kann. Überbeanspruchungen können auch bei nicht gebeugter Wirbelsäule auftreten, wenn die Bandscheiben zusammengepresst sind und die Belastung nicht gleichmäßig verteilt wird, sondern nur auf eine kleine Fläche wirkt, mit der Folge eines großen Druckes auf diese Fläche. Ausschlaggebend ist also auch die Verteilung der auftretenden Kräfte.



Bei der Wirbelsäule gibt es ein komplexes Muskelzugsystem, das mit den Zugleinen eines Schiffsmastes verglichen werden kann. In Bild 4 sind Bauchmuskeln ( $F_B$ ) und ihre Antagonisten, die Rückenmuskeln ( $F_R$ ), dargestellt. Ihr fein abgestimmtes Zusammenspiel garantiert eine aufrechte Haltung und Beweglichkeit des Oberkörpers.

Bild 4: Die Rumpfmuskulatur für die Erhaltung der aufrechten Körperhaltung. Die Pfeile  $F_B$  und  $F_R$  der von den Bauch- und Rückenmuskeln ausgeübten Kräfte sind nicht maßstabsgerecht zueinander gezeichnet.

Die Muskeln, die die Wirbelsäule aufrecht halten müssen, ziehen immer mit einer Komponente nach unten und üben damit auf die Wirbelsäule einen zusätzlichen Druck aus. Der Druck auf die Wirbelsäule ist daher nicht nur von dem darüberliegenden Körpergewicht und äußeren Belastungen gegeben, sondern auch von der Kraft die die Muskeln ausüben, um die Gewichtsmomente aufzuheben, damit ein Gleichgewicht vorliegt.

Die Bauchmuskeln sind häufig schwach, die Rückenmuskeln hingegen kräftig. Der Grund liegt darin, dass die Rückenmuskeln oft gegen die Schwerkraft arbeiten müssen und außerdem die Länge des Kraftarmes klein ist. Dieser Kraftarm ist der Abstand zwischen dem Drehpunkt (Zentrum der Lendenwirbel) und der Richtung des Muskelzugs und beträgt beim Menschen ungefähr 5 cm.

Im Stehen verläuft das Schwerpunktlot des Oberkörpers nur wenige cm vor dem Zentrum der Lendenwirbelscheibe (Bild 5).

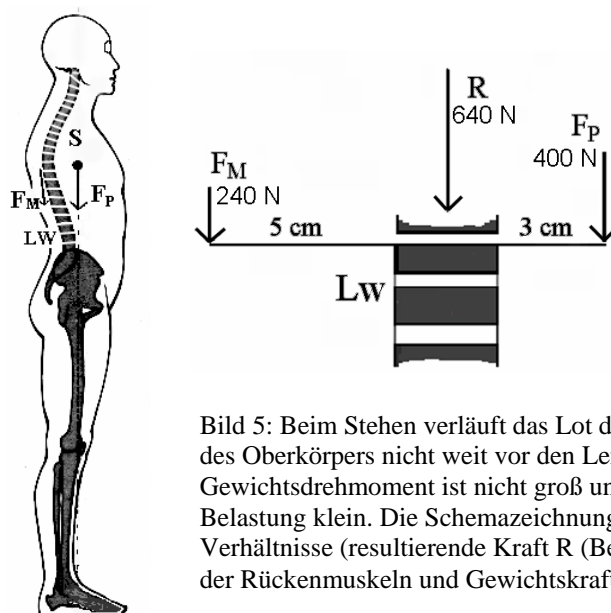


Bild 5: Beim Stehen verläuft das Lot des Schwerpunkts (S) des Oberkörpers nicht weit vor den Lendenwirbeln LW, das Gewichts Drehmoment ist nicht groß und daher ist die Belastung klein. Die Schemazeichnung verdeutlicht die Verhältnisse (resultierende Kraft R (Belastung), Kraft  $F_M$  der Rückenmuskeln und Gewichtskraft  $F_P$ ).

Die beiden Drehmomente, hervorgerufen durch die Gewichtskraft und die Rückenmuskeln, müssen sich im Gleichgewichtszustand kompensieren. Wenn wir annehmen, dass der Hebelarm des Gewichtes des Oberkörpers vom Zentrum der Wirbelscheibe 3 cm, der hintere Hebelarm der Rückenmuskel 5 cm und die Gewichtskraft des Oberkörpers  $F_P = 400 \text{ N}$  ( $m \approx 40 \text{ kg}$ ) ist, ergibt sich aus  $400 \text{ N} \cdot 3 \text{ cm} = F_M \cdot 5 \text{ cm}$  für die von den Rückenmuskeln auszuübende Kraft  $240 \text{ N}$ . Die aus Körpergewicht und von den Muskeln ausgeübte resultierende Kraft wirkt direkt auf die Bandscheibe bzw. das Gelenk und ist für ihre Beanspruchung maßgebend.

Die Kraft  $F_M$  haben wir in diesem und in anderen Beispielen als Summe aller von den Muskeln ausgeübten Kräfte bezeichnet, wohlverstanden aber, dass diese Substitution wegen der in verschiedene Richtungen wirkenden Kräfte, die auch unterschiedliche Angriffspunkte haben, eine Annäherung bzw. ein vereinfachtes Modell darstellt. Außerdem haben wir  $F_M$  als vertikal wirkend betrachtet, denn die kräftigeren Muskeln verlaufen parallel zur Wirbelsäule, die ja im Wesentlichen vertikal verläuft.

### Belastung bei dickbäuchigen Menschen und bei schlechter Körperhaltung

Man spricht im Allgemeinen von einer guten Haltung, wenn der Rücken eine aufrechte und gestreckte Position einnimmt, aber gleichzeitig entspannt ist. In dieser Lage sind Bandscheiben, Muskeln, Sehnen und Bänder weitgehend entlastet und werden kaum beansprucht.

Viele Menschen haben jedoch eine schlechte Körperhaltung, die oft mit einer Schwerpunktverlagerung einher geht und eine zusätzliche Belastung für die Wirbelsäule und eine Mehrarbeit der aufrecht haltenden Muskulatur bedeutet.

Als Beispiel betrachten wir einen untrainierten und dickbäuchigen Menschen, bei dem die Bauchmuskeln völlig erschlafft sind und der schwere Bauch sich nach vorne schiebt. Der Schwerpunkt des oberen Körperteiles wird daher nach vorne verschoben und das Lot des Schwerpunktes  $S$  fällt weiter als normal vor die Lendenwirbel  $LW$  (Bild 6).

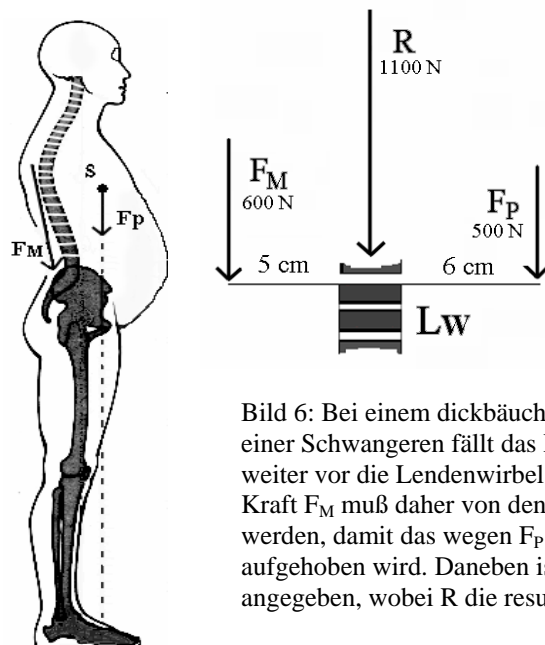


Bild 6: Bei einem dickbäuchigen Menschen oder auch bei einer Schwangeren fällt das Lot des Schwerpunktes  $S$  etwas weiter vor die Lendenwirbel  $LW$  als normal. Eine erhöhte Kraft  $F_M$  muß daher von den Rückenmuskeln ausgeübt werden, damit das wegen  $F_P$  wirkende Drehmoment aufgehoben wird. Daneben ist das zugehörige Kraftschema angegeben, wobei  $R$  die resultierende Kraft ist.

Es entsteht daher ein Drehmoment, das von den Rückenmuskeln kompensiert werden muß. Nehmen wir an, dass das Körpergewicht oberhalb der Lendenwirbelsäule nun ca. 50 kg beträgt und daher der Abstand der Lotlinie vom Zentrum der Bandscheibe des unteren Lendenwirbels 6 cm beträgt. Wenn der Abstand zwischen Lendenwirbelsäule und Rückenmuskulatur weiterhin 5 cm beträgt, gilt  $500 \text{ N} \cdot 6 \text{ cm} = F_M \cdot 5 \text{ cm}$ . Die Rückenmuskeln müssen deshalb eine Kraft  $F_M$  vom Betrag 600 N ausüben, um das wirkende Moment der Gewichtskraft des Körpers auszugleichen und den aufrechten Stand zu sichern. Die Belastung auf die Bandscheiben der Lendenwirbelsäule von 1100 N ist durch die Summe beider Kräfte gegeben. Wie man sieht, ist diese Belastung fast doppelt so groß wie bei einem trainierten Menschen. Außerdem kommt bei untrainierten Menschen wenig Hilfe von der Bauchmuskulatur, die bei Anspannung den intraabdominalen Druck erhöhen und dem Rumpf helfen könnte, sich aufrecht zu halten.

Wenn der Körper nach hinten gebeugt wird um das Schwerpunktlot den Lendenwirbeln zu nähern, nimmt man eine anatomisch sehr unnatürliche Haltung ein.

### Belastung beim Sitzen

Im Allgemeinen geht beim spontanen Sitzen die S-Form der Wirbelsäule verloren. Gerades Sitzen ohne Rückenlehne ist bekanntermaßen ermüdend und führt nach einer gewissen Zeit zum Einsacken des Rumpfes. Beim Lesen und Schreiben ist die Blickrichtung von maßgeblicher Bedeutung für die Kopfstellung und damit für die Stellung und Krümmung des Rückens. Meist beugt man sich nach vorne über, was langfristig zu Kopfschmerz (Antiflexionskopfschmerzen) und Rücken-Nacken-Beschwerden führen kann.

Beim üblichen Sitzen verläuft die Lotlinie des Schwerpunkts weit vor dem Lendenwirbel, während der Hebelarm des Rückenmuskels, wie beim Stehen, ungefähr 5 cm lang ist (Bild 7). Der Bandscheibeninnendruck bzw. die Belastung ist daher groß und abhängig von der Beugung nach vorne. Wenn wir annehmen, dass die Lotlinie im Abstand von 15 cm von der Lendenwirbelsäule verläuft, ergibt sich aus der oben genannten Gleichung eine wirkende Kraft auf die Bandscheibe von 1,6 kN. Einige Autoren haben gemessen, dass die letzten Lendenwirbelscheiben beim Sitzen stärker beansprucht sind als beim Liegen oder Stehen. Sie fanden Druckwerte um 250 kPa im Liegen, 550 kPa im Stehen und 700 kPa im Sitzen [Schobert (1989)]. Beim Autofahren ist die Belastung durch die Stöße bei unebener Straße noch größer.

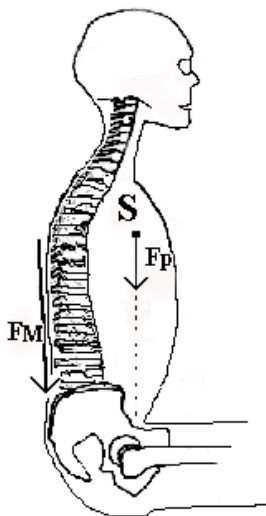


Bild 7: Beim freien Sitzen verläuft das Lot der Oberkörpergewichtskraft ( $F_p$ ) weit vor der Wirbelsäule, die Belastung ist damit groß und hängt von der Beugung nach vorne ab. S ist der Schwerpunkt des Oberkörpers und  $F_M$  die von den Muskeln zur Herstellung des Gleichgewichtes auszuübende Kraft.

## Belastung beim Heben

Die Beanspruchung der Wirbelsäule beim Hantieren mit Lasten hängt von der Masse und gegebenenfalls von der Beschleunigung der bewegten Last, von der Körperhaltung und von der Dauer der Belastung ab [Hartmann (1996); Hobbs (1991)]. Bei beidhändigem, symmetrischem Halten von Lasten kann man zur Berechnung von Drehmomenten und Kräften ein zweidimensionales Modell verwenden (Bild 16). Die Summe aller Drehmomente von allen Körperteilen und gehaltenem Gewicht ist gleich dem Drehmoment der gesamten Gewichtsmasse konzentriert im Schwerpunkt.

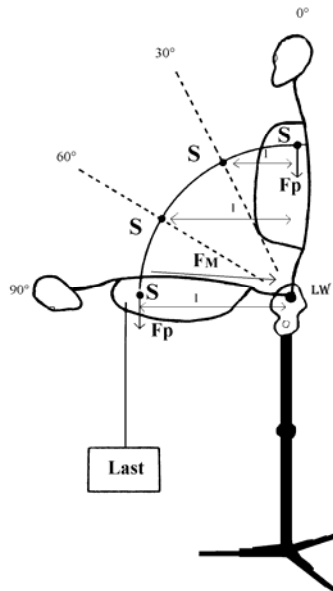


Bild 8: Modell zur Bestimmung der Belastung der Wirbelsäule beim Halten einer Last in verschiedenen Lagen, wobei S der Schwerpunkt des gesamten Systems,  $F_p$  das gesamte Gewicht (Oberkörper + Last),  $F_M$  die Rückenmuskelkraft, l der Hebelarm und LW die Lendenwirbeln sind. Auf Grund der großen Masse des Ständers fällt das Modell nicht um.

Wenn der gesamte Schwerpunkt des Oberkörpers und der Last genau über der Wirbelbasis liegt, d.h. die Wirbelsäule etwa vertikal ist, dann ist das Drehmoment null. Die axiale Belastung in der unteren Wirbelsäule ist dann nur  $F_p$  und zwar die Gewichtskraft vom Oberkörper z. B. 400 N ( $m \approx 40$  kg) und die Gewichtskraft der Last von z. B. 500 N ( $m \approx 50$  kg), insgesamt also 900 N. Von vertikaler zu horizontaler Lage wird die Länge (l) des Hebelarmes größer mit einem Maximum bei 90°. In dieser Lage, wenn wir für die Länge des Hebelarmes des Schwerpunkts von den Lendenwirbeln 30 cm annehmen, entsteht ein Drehmoment von  $900 \text{ N} \cdot 30 \text{ cm}$ . Wenn der Hebelarm der Rückenmuskeln 5 cm ist, muß für das Gleichgewicht die von der Rückenmuskulatur ausbalancierende Kraft  $F_M$  gleich 5400 N sein. Die Belastung in den Wirbeln hat in diesem Fall sowohl eine vertikale als auch eine horizontale Komponente. Wenn wir annehmen, dass die Muskelkraft horizontal zieht, so ist die Belastung in horizontaler Richtung 5400 N und in vertikaler 900 N. Die Belastung erzeugt i. Allg. sowohl eine Kompressionskraft, hauptsächlich von der Rückenmuskulatur kommend (infolge ihres annähernd parallelen Verlaufes zur Wirbelsäule), als auch eine Scherkraft, die durch einen Teil der Gewichtskraft gegeben ist. Die Verteilung beider Kräfte hängt von der Orientierung der Wirbelsäule ab.

## Literatur:

- BETZ U.; Hopf C.; Bodem F. (1998): Vergleichende Untersuchung zu verschiedenen mittleren Sitzhaltungen – eine prospektive kontrollierte Studie. Krankengymnastik 50/11, S. 1871-1882
- HARTMANN H.; Schardt A.; Pangert R. (1996): Wirbelsäule Belastungen und ihre Häufigkeit und Dauern in unterschiedlichen Berufen. Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed. 31/5, S. 213-216

HOBBS H.; Aurora T.S. (1991): Biomechanics of the spine. Phys. Educ., S. 99-103  
RAUBER A.; Leonhardt H. (1978): Anatomie des Menschen, Band I. Stuttgart: Thieme  
SCHOBERT H. (1989): Orthopädie des Sitzens. Berlin: Springer-Verlag  
WEINECK J. (1984): Sportanatomie. Ballingen: Perimed-spitta, Med. Verl. Ges.