

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>3</b> | <b>Der Mensch als Mehrkörpermodell.....</b>                            | <b>1</b> |
| 3.1      | Modellübersicht .....  | 1        |
| 3.2      | Ermittlung der Körperdaten der Segmente - Anthropologische Daten ..... | 6        |
| 3.2.1    | Modellvereinfachungen.....   | 6        |
| 3.2.2    | Verwendung von skalierten Massendaten .....                            | 9        |
| 3.2.3    | Experimentelle Bestimmung von Segmentdaten .....                       | 15       |
| 3.2.4    | Berechnung der Massendaten zusammengesetzter Körper .....              | 19       |
| 3.3      | Festlegung der Gelenke und deren Bewegungsbereiche .....               | 22       |
| 3.4      | Die Muskulatur in MKS-Modell .....                                     | 24       |



### 3 Der Mensch als Mehrkörpermodell

Der Mensch – hier betrachten wir seinen Bewegungsapparat (Bild 2.2 oder Bild 3.1) – kann im Sinne der Mechanik als Mehrkörpersystem (MKS) angesehen werden. Die **Körpersegmente**, die sich durch die natürlichen Gelenke bilden, werden als Körper (in der Regel starre Körper) betrachtet. Die Bewegungsgleichungen hierfür sind in Abschn. 2.1 und 2.2 zu finden. Die natürlichen **Gelenke** des Menschen bilden wir durch technische Gelenke gemäß Abschn. 2.3 ab. Die Bewegung des Menschen wird durch **Muskeln** geprägt. Sie werden als axiale Kraftelemente (Abschn. 2.4.1) modelliert. Alternativ zu der Vielzahl der aktiven Muskeln, die ein bestimmtes Gelenk bewegen, werden auch Modelle mit resultierendem Muskelmoment benutzt. Diese Modelle werden durch Torsionselemente beschrieben.

Kraftgesetze für Muskelmodelle werden in Kap. 4 besprochen.

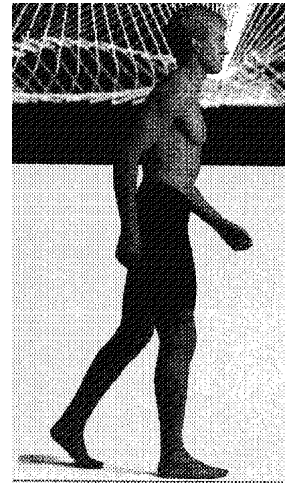


Bild 3.1: Der Bewegungsapparat "Mensch"

#### 3.1 Modellübersicht

Ein allumfassendes Modell zur Simulation des Bewegungsvorgangs des Menschen existiert nicht. Tabelle 3.1 zeigt einige Modelle aus der Literatur, die für unterschiedliche Anwendungen entwickelt wurden.

Bild 3.6 stellt den menschlichen Bewegungsapparat dar, wie er hier im Weiteren betrachtet werden soll. Hierfür wird ein MKS (Bild 3.7) mit Modelldaten aufgestellt.

| Benennung   | Repräsentierende Glieder  | Anwendung  |
|---|---|--|
| 3-gliedriges 2D-Modell mit Schwabbelmassen nach (Gruber, Hospach et al. 1992), Bild 3.2 | 2D-Modell, mit Unterschenkel incl. Fuß, Oberschenkel und Stamm (Rumpf & Hals & Kopf) incl. Arme                                 | Sprung auf Unterlage, Turnen, siehe Bild 1.4                       |
| 30-gliedriges 3D-Modell "Dortmunder Modell" nach (Jäger 1986), Bild 3.3                 | 3D-Modell, mit Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel, Hüftknochen, Lendenwirbeln, Brustkorb, Kopf, Schulter, Oberarm, Unterarm, Hand | Belastung der Wirbelsäule bei Tätigkeiten im Beruf, siehe Bild 1.3 |
| 17-gliedriges 3D-Modell nach H. Hatze Bild 3.4  | 3D-Modell, mit Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel, Bauchraum, Brustkorb, Kopf, Schulter, Oberarm, Unterarm, Hand                  |  |
| 14-gliedriges Modell nach (Winter 1990), Bild 3.5                                       | 3D-Modell für Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel, Rumpf, Kopf, Oberarm, Unterarm, Hand  | Simulationen des Bewegungsgangs, mit SIMPACK, Bild 3.7             |

Tabelle 3.1: Modelle des Menschen für verschiedene Simulationsaufgaben. Die Angaben in den betreffenden Bildern werden im Abschn. 3.2 besprochen.

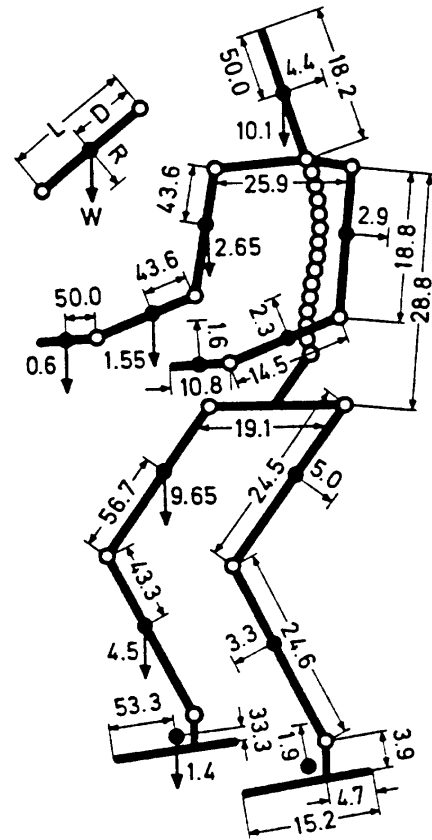
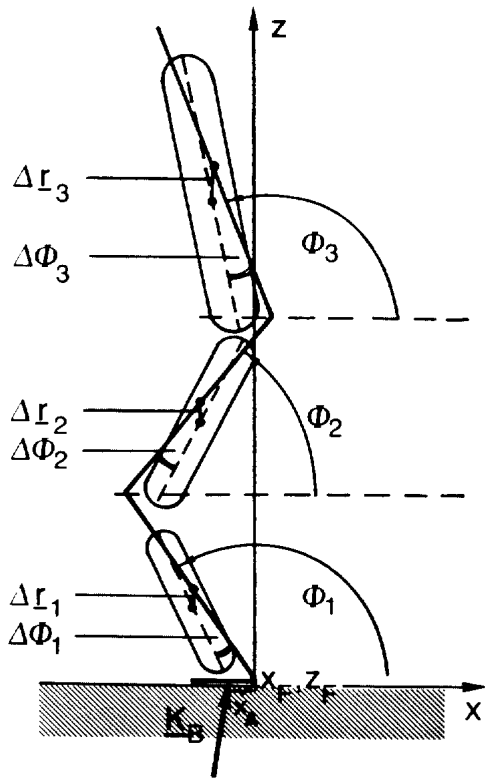


Bild 3.2: 2D-Modell nach (Gruber, Hospach et al. 1992) Bild 3.3: 3D-Modell nach (Jäger 1986)

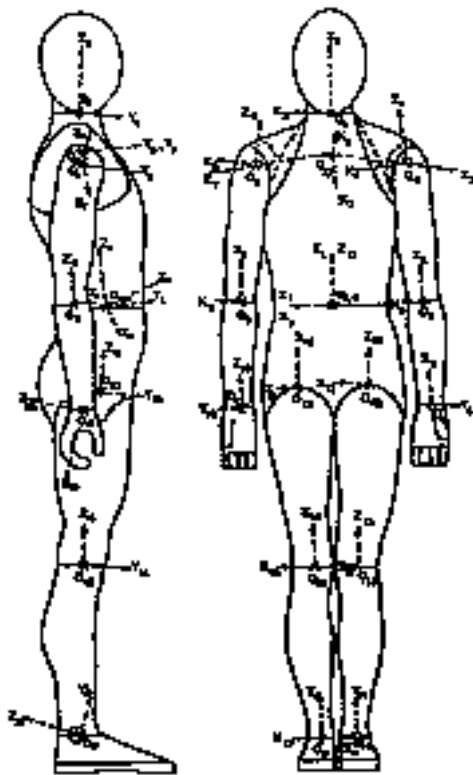


Bild 3.4: 3D-Modell nach H. Hatze

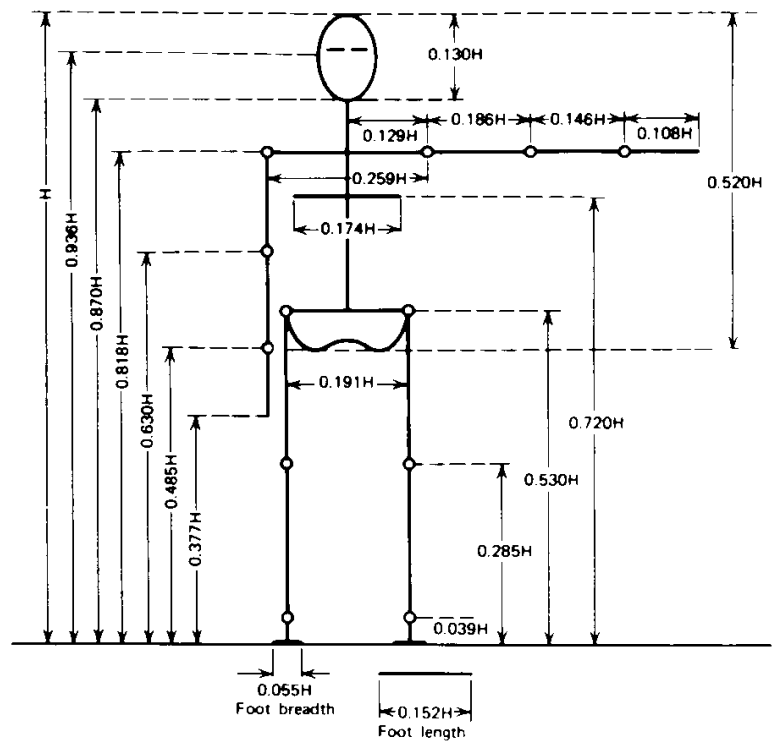


Bild 3.5: Modell nach (Winter 1990)

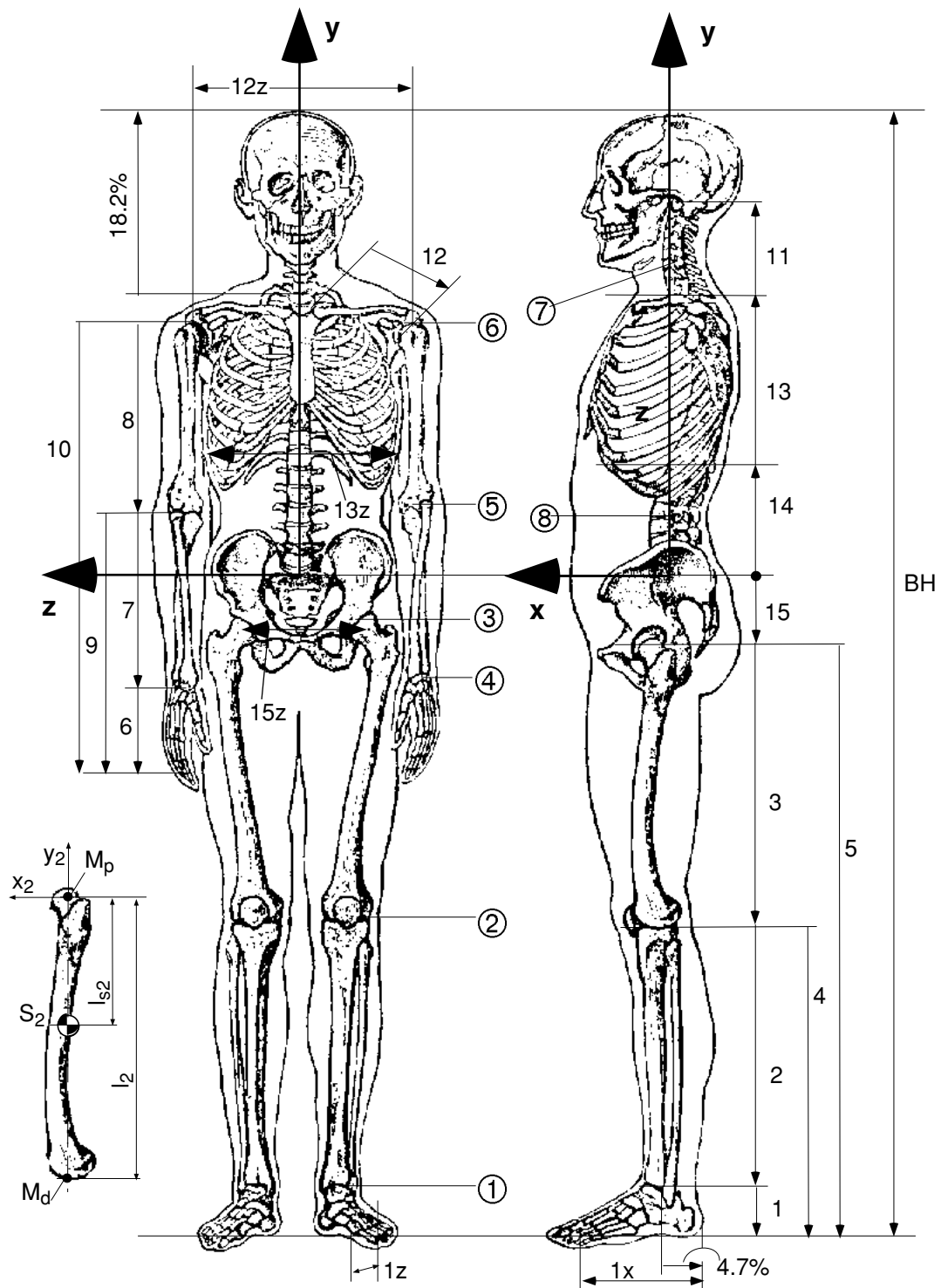


Bild 3.6: Der Mensch in Frontalansicht (Frontalebene) und Seitenansicht (Medianebene) mit Angabe der Segmente 1,... und Gelenke ①, ..., erklärt in Tab. 3.6 und Tab. \_\_\_\_\_

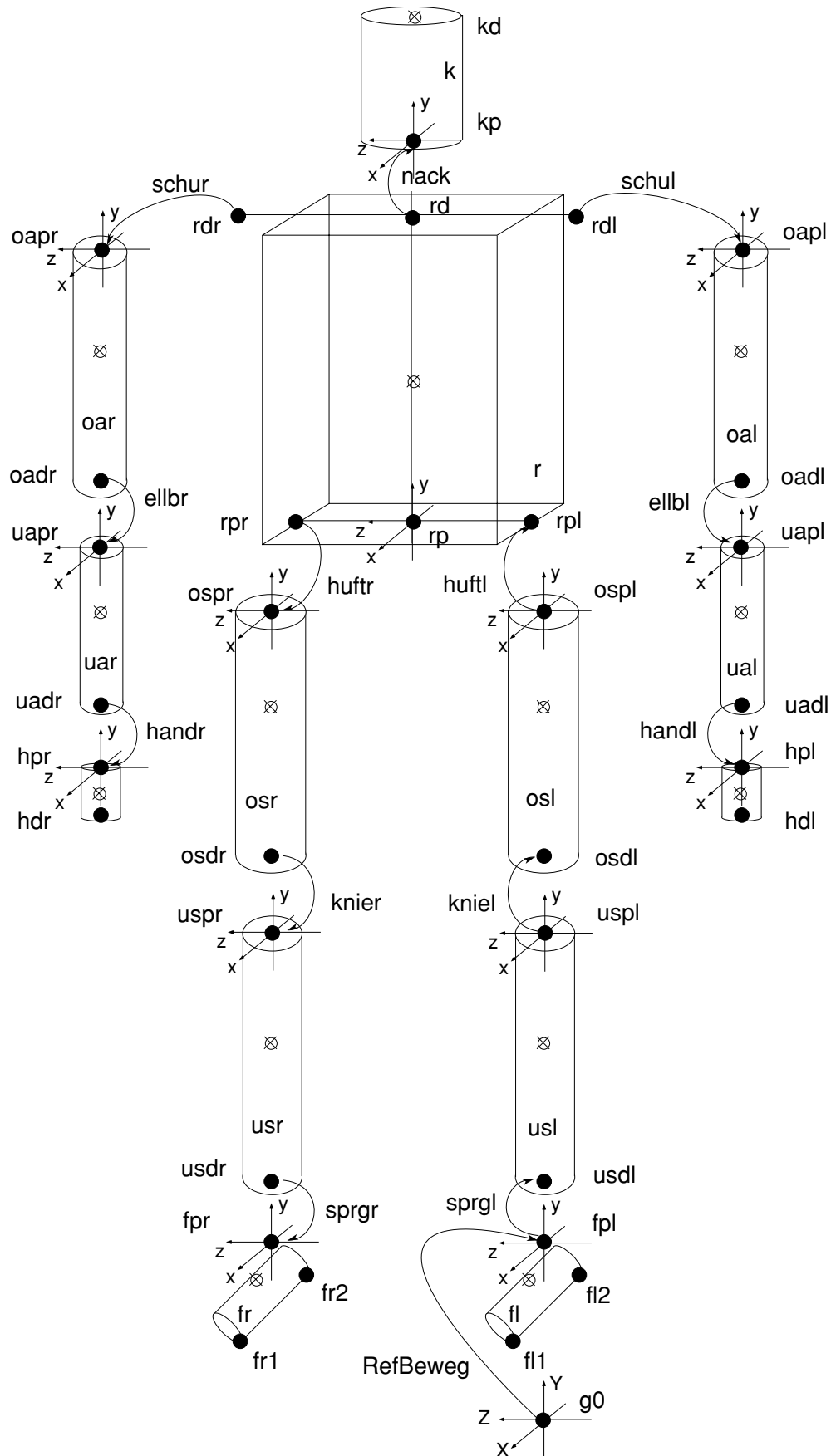


Bild 3.7: 14-gliedriges MGS-Modell des Menschen, entwickelt für Simulationen mit SIMPACK, mit Angabe der Körper, Gelenke und Marker, proximal (p) oder distal (d), links (l) oder rechts (r)

⊗ = Massenmittelpunkt

Legende: f = Fuß, us = Unterschenkel, os = Oberschenkel, ua = Unterarm, oa = Oberarm, h = Hand, r = Rumpf, k = Kopf.

Durch den Einsatz von MKS-Programmen hat sich Zahl der Modelle erheblich erhöht, siehe hierzu die aktuellen Tagungsbände der Konferenzen zur Biomechanik.

**Beachte: Steht der Mensch auf einem Bein (Bild 3.7), so liegt ein offenes MKS vor.**

**Andernfalls muß man ein geschlossenes MKS aufstellen.**

**Der Kontakt des zweiten Fußes beschreibt die Schließbedingungen.**

**Das gilt auch für die anderen Körpersegmente, siehe Bild 3.8.**

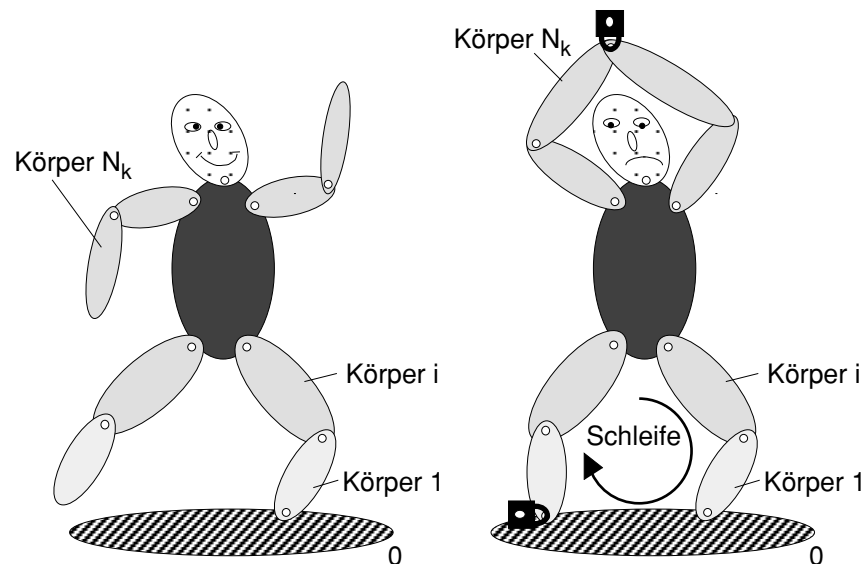


Bild 3.8: Offenes und geschlossenes MKS-Modell des Menschen

**Merke: Lege das Modell entsprechend der Aufgabenstellung so einfach an wie möglich, aber so aufwendig wie nötig an!**

## 3.2 Ermittlung der Körperdaten der Segmente - Anthropologische Daten

### 3.2.1 Modellvereinfachungen

Wenn wir die Segmente des menschlichen Bewegungsapparates (Bild 3.6) durch starre Körper beschreiben, sind nach Abschn. 2.1.1 folgende Daten erforderlich (Index  $i$  repräsentiert einen Körper):

- körperfestes **Koordinatensystem**  $B_i = \{O_i, \vec{e}_i\}$  mit Ursprung  $O_i$  und den Basisvektoren  $\vec{e}_i$

- Lage des **Schwerpunkts**  $S_i$  von  $O_i$  = Ortsvektor  $\mathbf{r}_{Si} = \begin{pmatrix} r_{Si_x} \\ r_{Si_y} \\ r_{Si_z} \end{pmatrix}$ , dargestellt in Basis  $\vec{e}_i$ , Einheit [m]

- **Masse**  $m_i$ , Einheit [kg]

- **Massenträgheitsmatrix**  $\mathbf{I}_{Si} = \begin{pmatrix} I_{Si_{xx}} & I_{Si_{xy}} & I_{Si_{xz}} \\ & I_{Si_{yy}} & I_{Si_{yz}} \\ sym. & & I_{Si_{zz}} \end{pmatrix}$  bez.  $S_i$  dargestellt in Basis  $\vec{e}_i$ , Einheit [ $\text{kgm}^2$ ]

Die Elemente  $I_{Si_{xx}}, I_{Si_{yy}}, I_{Si_{zz}}$  sind die Hauptträgheitsmomente,

die Elemente  $I_{Si_{xy}}, I_{Si_{xz}}, I_{Si_{yz}}$  sind die Deviationsmomente.

- Neben dem Schwerpunkt besitzt ein Körper eine endliche Anzahl von **Markern**.
- Zur Darstellung des Körpers ist auch eine **3D-Geometrie** erforderlich.



Vielfach werden die Segmente vereinfacht modelliert:

1. Der proximale und distale Marker, ( $M_p$  und  $M_d$  genannt) sowie der Massenmittelpunkt  $S_i$  liegen **auf einer Linie**. Diese Linie wird im Referenzzustand des Menschen parallel zur vertikalen Achse angelegt, siehe Bild 3.9.

Für die Schwerpunktskoordinaten gilt mit dem proximalen Schwerpunktsabstand  $l_{Si}$

$$\mathbf{r}_{Si} = \begin{pmatrix} 0 \\ -l_{Si} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

2. Es wird von einem **kreisförmigen Querschnitt** (Transversalebene) ausgegangen. Das hat zur Folge, dass die Deviationsmomente  $I_{Si_{xy}}, I_{Si_{xz}}, I_{Si_{yz}}$  null sind und die Hauptträgheitsmomente

$$I_{Si_{xx}} = I_{Si_{zz}} \quad (3.2)$$

sind. Die Massenträgheitsmatrix hat somit die Belegung:

$$\mathbf{I}_{Si} = \begin{pmatrix} I_{Si_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & I_{Si_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{Si_{zz}} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Für diese Hauptträgheitsmomente  $I_{Si_{xx}}$  und  $I_{Si_{zz}}$  kann man auch einen Trägheitsradius finden. Aus der Analogie in Bild 3.9 schließt man mit (3.2)

$$I_{Si_{xx}} = I_{Si_{zz}} = I_{Si} = m_i i_{Si}^2. \quad (3.4)$$

3. Geht man von einem homogenen Zylinder aus (Bild 3.9), mit  $r_{zyl i}$  als Radius des Zylinders, so findet man mit Hilfe der Tabelle Massenträgheitsmomente (Kap0-15,16) für den noch fehlenden Wert

$$I_{Si_{yy}} = \frac{m_i}{2} r_{zyl i}^2. \quad (3.5)$$

4. Anstelle der Massenträgheitsmomente bez. Schwerpunkt  $S_i$  kann man die Massenträgheitsmomente bez. proximalem Marker  $M_p$  angeben. Es gilt:

$$I_{Pi_{xx}} = I_{Si_{xx}} + m_i l_{Si}^2 = m_i i_{Pi}^2 \quad \text{und} \quad I_{Pi_{zz}} = I_{Si_{zz}} + m_i l_{Si}^2 = m_i i_{Pi}^2. \quad (3.6)$$

Dabei ist  $i_{Pi}$  der Massenträgheitsradius für den proximalen Marker.

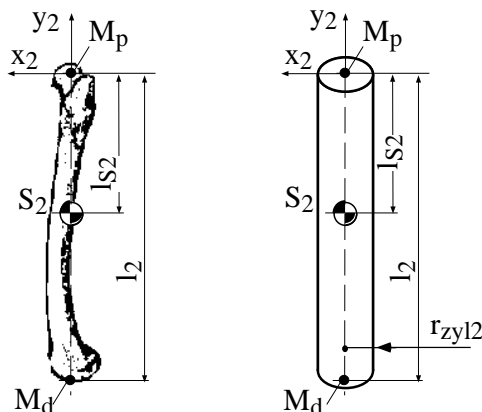
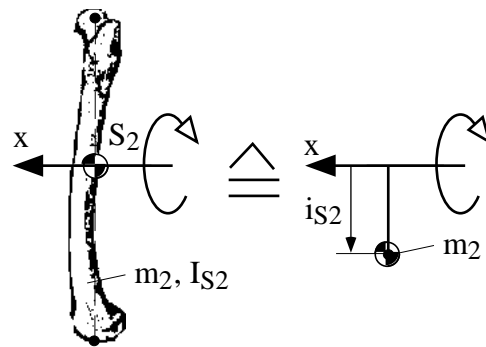


Bild 3.9: Ein Körpersegment ( $i = 2$ )  
und ein Zylindermodell.



3.10: Analogie Massenträgheitsradius  $i_{S2}$   
aus Fadenpendel mit Masse  $m_2$ .

In Tabelle 3.2 sind die Daten eines Körpersegmentes zusammengefaßt.

| Benennung der Körperdaten für Körper $i$ (Bild 3.9 und Bild 3.10) | Variable    | Einheit |
|---|-------------|---------|
| Masse   | $m_i$       | kg      |
| Segmentlänge zwischen Marker $M_p$ und $M_d$                      | $l_i$       | m       |
| Schwerpunktsabstand vom proximalen Marker $M_p$                   | $l_{Si}$    | m       |
| Massenträgheitsradius bez. Schwerpunkt $S_i$                      | $i_{Si}$    | m       |
| Massenträgheitsradius bez. proximalem Marker $M_p$                | $i_{Pi}$    | m       |
| Radius des Zylindermodells für $I_{S_{iyy}} = I_{P_{iyy}}$        | $r_{zyl i}$ | m       |

Tabelle 3.2: Erforderliche Daten für ein Körpersegment infolge Vereinfachungen.

### 3.2.2 Verwendung von skalierten Massendaten

Für Forschungszwecke und zum Austausch von Ergebnissen in Publikationen skaliert man die Massen- und Längendaten der Segmente des menschlichen Körpers.

Drei Bezugsmaße werden dabei verwendet:

- die Körpergröße  $BH$  [m] (body height),
- die Körpermasse  $BM$  [kg] (body mass) und
- die Segment-Bezugslängen  $l_{Bezi}$  [m] aller Segmente  $i$ .

Ihre Anwendung sei wie folgt:

$$\text{Bestimmung der Segmentlänge } l_i [m] = BH [m] \cdot \bar{l}_i [\%] / 100\% \quad (3.7)$$

wobei  $\bar{l}_i$  ist die skalierte Segmentlänge in % für das Segment  $i$ .

$$\text{Bestimmung des Segmentradius } r_{zyli} [m] = BH [m] \cdot \bar{r}_{zyli} [\%] / 100\% \quad (3.8)$$

wobei  $\bar{r}_{zyli}$  ist der skalierte Segmentradius in % für das Segment  $i$ .

$$\text{Bestimmung der Segmentmasse } m_i [m] = BM [kg] \cdot \bar{m}_i [\%] / 100\% \quad (3.9)$$

wobei  $\bar{m}_i$  ist die skalierte Segmentmasse in % für das Segment  $i$ .

$$\text{Bestimmung des Schwerpunktabstands } l_{Si} [m] = l_{Bezi} [m] \cdot \bar{l}_{Si} [\%] / 100\% \quad (3.10)$$

$$\text{und Massenträgheitsradien bez. } S_i \quad i_{Si} [m] = l_{Bezi} [m] \cdot \bar{i}_{Si} [\%] / 100\% \quad (3.11)$$

$$\text{und Massenträgheitsradien bez. } M_p \quad i_{Pi} [m] = l_{Bezi} [m] \cdot \bar{i}_{Pi} [\%] / 100\% \quad (3.12)$$

wobei  $\bar{l}_{Si}$  ist der skalierte Schwerpunktabstand in %,

und  $\bar{i}_{Si}$  und  $\bar{i}_{Pi}$  sind die skalierten Massenträgheitsradien für das Segment  $i$ .

Seit über 200 Jahren sind Wissenschaftler dabei, die Segmentdaten des Menschen zu vermessen und zu skalieren. Hier einige wichtige Namen: Harless (1806), Braune & Fischer (1889 & 1906), Dempster (1955), Clauser (1969). In den meisten Fällen war das Militär der Auftraggeber, um genormte bzw. passende Ausrüstungen festzulegen.

Die Tabellen 3.3 und 3.4 aus Nigg (1994), S. 345 und Nigg (1994), S. 353, stellen unterschiedliche Ergebnisse gegenüber. Eine weitere detaillierte Auflistung ist in Winter (1990), S. 56, zu finden, siehe Tab. 3.5.

Für unsere Anwendungen wurde die Tabelle 3.6 erstellt. Sie basiert auf den Angaben aus (Winter 1990, Tab. 3.5 und Jäger, Luttmann et al. 1991) .

**Für Publikationen werden häufig normierte Maße benutzt:  $BH = 1.733$  m und  $BM = 69$  kg.**

Tabelle 3.7 enthält eine Auswertung der Glg. (3.7) bis (3.12) für alle Segmente unter Verwendung der Normmaße, siehe homepage

**Merke: Die realen Werte können bis zu 100 % von den skalierten Daten abweichen!**

|                  | HARLESS<br>(1806) |                | BRAUNE &<br>FISCHER<br>(1889) |                | FISCHER<br>(1906) |                | DEMPSTER<br>(1955) |                | CLAUSER<br>(1969) |                |
|------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|-------------------|----------------|
| Segment          | $\bar{m}_i$       | $\bar{l}_{Si}$ | $\bar{m}_i$                   | $\bar{l}_{Si}$ | $\bar{m}_i$       | $\bar{l}_{Si}$ | $\bar{m}_i$        | $\bar{l}_{Si}$ | $\bar{m}_i$       | $\bar{l}_{Si}$ |
|                  | [%]               | [%]            | [%]                           | [%]            | [%]               | [%]            | [%]                | [%]            | [%]               | [%]            |
| HEAD             | 7.6               | 36.2           | 7.0                           |                | 8.8               |                | 7.9                |                | 7.3               |                |
| TRUNK            | 44.2              | 44.8           | 46.1                          |                | 45.2              |                | 46.9               |                | 50.7              |                |
| ARM              | 5.7               |                | 6.2                           | 52.6           | 5.4               | 44.6           | 4.9                | 51.2           | 4.9               | 41.3           |
| UPPERARM         | 3.2               |                | 3.3                           | 47.0           | 2.8               | 45.0           | 2.7                | 43.6           | 2.6               | 51.3           |
| FOREARM & HAND   | 2.6               |                | 3.0                           | 47.2           | 2.6               | 46.2           | 2.2                | 67.7           | 2.3               | 62.6           |
| FOREARM          | 1.7               | 42.0           | 2.1                           | 42.1           |                   |                | 1.6                | 43.0           | 1.6               | 39.0           |
| HAND             | 0.9               | 39.7           | 0.8                           |                |                   |                | 0.6                | 50.6           | 0.7               |                |
| LEG              | 18.4              |                | 17.3                          | 40.7           | 17.6              | 41.2           | 15.7               | 43.4           | 16.1              | 38.2           |
| UPPER LEG        | 11.9              | 48.9           | 10.7                          | 43.9           | 11.0              | 43.6           | 9.6                | 43.3           | 10.3              | 37.2           |
| LOWER LEG & FOOT | 6.6               |                | 6.5                           | 51.9           | 6.6               | 53.7           | 5.9                | 43.4           | 5.8               | 47.5           |
| LOWERLEG         | 4.6               | 43.3           | 4.7                           | 42.0           | 4.5               | 43.3           | 4.5                | 43.3           | 4.4               | 37.1           |
| FOOT             | 2.0               | 44.4           | 1.7                           | 43.4           | 2.1               |                | 1.4                | 42.9           | 1.5               | 44.9           |

Tabelle 3.3: Anthropometric Data aus Nigg (1994), S. 345

$\bar{m}_i$  [%] = auf BM bezogene Segmentmasse,

$\bar{l}_{Si}$  [%] = auf  $l_{\text{Bezi}}$  bezog. Massenmittelpunktsabstand in y-Richtg. (bez. Gelenkpunkt proximal)

Table 3.7.5

**Relative segment mass comparisons for different selected experimental methods.** Relative segment masses are given as a percentage of the total body mass. The values for Hatze were calculated based on volumes from Hatze (1980) and average segment densities from Dempster (1955). The difference in the results between Dempster and Zatzlorsky & Seluyanov may be explained by the different subjects studied. Zatzlorsky & Seluyanov studied athletes.

| SEGMENT      | RELATIVE SEGMENT MASS [%] |                             |                 |  |                  |                  |
|--------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--|------------------|------------------|
|              | DEMPSTER<br>(1955)        | CLAUSER<br>ET AL.<br>(1969) | HATZE<br>(1980) | ZATZIORSKY<br>&<br>SELUYANOV<br>(1983) | JENSEN<br>(1986) | JENSEN<br>(1986) |
|              | ADULTS                    | ADULTS                      | ADULTS          | ADULTS                                 | 12 YEARS<br>OLD  | 15 YEARS<br>OLD  |
| HEAD         | 7.9                       | 7.3                         | 6.5             | 6.9                                    | 10.1             | 6.7              |
| TRUNK        | 49.6                      | 50.7                        | 45.1            | 43.5                                   | 41.7             | 41.6             |
| THIGH        | 9.7                       | 10.3                        | 11.9            | 14.2                                   | 11.0             | 12.1             |
| SHANK        | 4.5                       | 4.0                         | 5.5             | 4.3                                    | 5.3              | 5.6              |
| FOOT         | 1.4                       | 1.5                         | 1.5             | 1.4                                    | 2.1              | 2.1              |
| UPPER<br>ARM | 2.7                       | 2.6                         | 2.9             | 2.7                                    | 3.2              | 3.5              |
| LOWER<br>ARM | 1.6                       | 1.6                         | 1.8             | 1.6                                    | 1.7              | 1.7              |
| HAND         | 0.6                       | 0.7                         | 0.6             | 0.6                                    | 0.9              | 0.8              |

Tabelle 3.4: Skalierte Massendaten aus Nigg (1994), S. 353.

**Table 3.1 Anthropometric Data**

| Segment            | Definition                               | Segment Weight/<br>Total Body Weight | Center of Mass/<br>Segment Length |          | Radius of Gyration/<br>Segment Length |          |          | Density |
|--------------------|--|--------------------------------------|-----------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|----------|---------|
|                    |  |                                      | Proximal                          | Distal   | C of G                                | Proximal | Distal   |         |
| Hand               | Wrist axis/knuckle II middle finger      | 0.006 M                              | 0.506                             | 0.494 P  | 0.297                                 | 0.587    | 0.577 M  | 1.16    |
| Forearm            | Elbow axis/ulnar styloid                 | 0.016 M                              | 0.430                             | 0.570 P  | 0.303                                 | 0.526    | 0.647 M  | 1.13    |
| Upper arm          | Glenohumeral axis/elbow axis             | 0.028 M                              | 0.436                             | 0.564 P  | 0.322                                 | 0.542    | 0.645 M  | 1.07    |
| Forearm and hand   | Elbow axis/ulnar styloid                 | 0.022 M                              | 0.682                             | 0.318 P  | 0.468                                 | 0.827    | 0.565 P  | 1.14    |
| Total arm          | Glenohumeral joint/ulnar styloid         | 0.050 M                              | 0.530                             | 0.470 P  | 0.368                                 | 0.645    | 0.596 P  | 1.11    |
| Foot               | Lateral malleolus/head metatarsal II     | 0.0145 M                             | 0.50                              | 0.50 P   | 0.475                                 | 0.690    | 0.690 P  | 1.10    |
| Leg                | Femoral condyles/medial malleolus        | 0.0465 M                             | 0.433                             | 0.567 P  | 0.302                                 | 0.528    | 0.643 M  | 1.09    |
| Thigh              | Greater trochanter/femoral condyles      | 0.100 M                              | 0.433                             | 0.567 P  | 0.323                                 | 0.540    | 0.653 M  | 1.05    |
| Foot and leg       | Femoral condyles/medial malleolus        | 0.061 M                              | 0.606                             | 0.394 P  | 0.416                                 | 0.735    | 0.572 P  | 1.09    |
| Total leg          | Greater trochanter/medial malleolus      | 0.161 M                              | 0.447                             | 0.553 P  | 0.326                                 | 0.560    | 0.650 P  | 1.06    |
| Head and neck      | C7-T1 and 1st rib/car canal              | 0.081 M                              | 1.000                             | — PC     | 0.495                                 | 1.116    | — PC     | 1.11    |
| Shoulder mass      | Sternoclavicular joint/glenohumeral axis | —                                    | 0.712                             | 0.288    | —                                     | —        | —        | 1.04    |
| Thorax             | C7-T1/T12-L1 and diaphragm*              | 0.216 PC                             | 0.82                              | 0.18     | —                                     | —        | —        | 0.92    |
| Abdomen            | T12-L1/L4-L5*                            | 0.139 LC                             | 0.44                              | 0.56     | —                                     | —        | —        | —       |
| Pelvis             | L4-L5/greater trochanter*                | 0.142 LC                             | 0.105                             | 0.895    | —                                     | —        | —        | —       |
| Thorax and abdomen | C7-T1/L4-L5*                             | 0.355 LC                             | 0.63                              | 0.37     | —                                     | —        | —        | —       |
| Abdomen and pelvis | T12-L1/greater trochanter*               | 0.281 PC                             | 0.27                              | 0.73     | —                                     | —        | —        | 1.01    |
| Trunk              | Greater trochanter/glenohumeral joint*   | 0.497 M                              | 0.50                              | 0.50     | —                                     | —        | —        | 1.03    |
| Trunk head neck    | Greater trochanter/glenohumeral joint*   | 0.578 MC                             | 0.66                              | 0.34 P   | 0.503                                 | 0.830    | 0.607 M  | —       |
| HAT                | Greater trochanter/glenohumeral joint*   | 0.678 MC                             | 0.626                             | 0.374 PC | 0.496                                 | 0.798    | 0.621 PC | —       |
| HAT                | Greater trochanter/mid rib               | 0.678                                | 1.142                             | —        | 0.903                                 | 1.456    | —        | —       |

\*NOTE: These segments are presented relative to the length between the greater trochanter and the glenohumeral joint.

Source Codes: M, Dempster via Miller and Nelson; *Biomechanics of Sport*, Lea and Febiger, Philadelphia, 1973. P, Dempster via Plagenhoef; *Patterns of Human Motion*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 1971. L, Dempster via Plagenhoef from living subjects; *Patterns of Human Motion*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1971. C, Calculated.

Tabelle 3.5: Anthropometric Data aus Winter (1990), S. 56

HAT = head + arms + trunk;

C = cervicales (Halswirbel), T = thoracicae (Brustwirbel), L = lumbales (Lendenwirbel)

| Nr. | Benennung                | Definition Segmentlängen  | $Nr$<br>$l_{Bezi}$ | $\bar{m}_i$ | $\rho$ | $\bar{l}_i$ | $\bar{l}_{Si}$ | $\bar{l}_{Si}$ | $\bar{l}_{Pi}$ | $\bar{r}_{zyli}$ |
|-----|--------------------------|---|--------------------|-------------|--------|-------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| 1x  | Fuß in x                 | lateralen Knöchel — Kopf des Mittelfußknochen   | 1x                 | 1.45        | 1.10   | 15.2        | 15.8           | 47.5           | 52.9           | 1.9              |
| 1y  | Fuß in y                 | lateralen Knöchel — Fersenbein  | 1y                 |             |        | 3.9         | 66.7           |                |                |                  |
| 1z  | Fuß in z                 | Fußbreite   | 1z                 |             |        | 5.5         | 50.0           |                |                |                  |
| 2   | Unterschenkel            | Gelenkknorren des Femur — medialer Knöchel  | 2                  | 4.65        | 1.09   | 24.6        | 43.3           | 30.2           | 52.8           | 3.3              |
| 3   | Oberschenkel             | großer Rollhügel des Femur — Gelenkknorren des Femur  | 3                  | 10.0        | 1.05   | 24.5        | 43.3           | 32.3           | 54.0           | 5.0              |
| 4   | Fuß+Untersch.            | Gelenkknorren des Femur — medialer Knöchel  | 2                  | 6.1         | 1.09   | 28.5        | 60.6           | 41.6           | 73.5           |                  |
| 5   | Bein                     | großer Rollhügel des Femur — medialer Knöchel   | 2+3                | 16.1        | 1.06   | 53.0        | 44.7           | 32.6           | 55.4           |                  |
| 6   | Hand                     | Handgelenkachse — Knöchel II Mittelfinger   | 6                  | 0.6         | 1.16   | 10.8        | 50.6           | 29.7           | 58.7           | 1.6              |
| 7   | Unterarm                 | Ellbogenachse — Griffelfortsatz (Ende Ulna)   | 7                  | 1.6         | 1.13   | 14.5        | 43.0           | 30.3           | 52.6           | 2.3              |
| 8   | Oberarm                  | Vertiefung des Humerus — Ellbogenachse  | 8                  | 2.8         | 1.07   | 18.8        | 43.6           | 32.2           | 54.2           | 2.9              |
| 9   | Hand+Unterarm            | Ellbogenachse — Griffelfortsatz   | 7                  | 2.2         | 1.14   | 25.3        | 68.2           | 46.8           | 82.7           |                  |
| 10  | Arm                      | Vertiefung des Humerus — Griffelfortsatz  | 7+8                | 5.0         | 1.11   | 44.1        | 53.0           | 36.8           | 64.5           |                  |
| 11  | Kopf + Hals              | C7-T1 & 1. Rippe — Ohrkanal   | 11                 | 8.1         | 1.11   | 11.8        | 100            | 49.5           | 111.6          | 4.4              |
| 12  | Schulter                 | Ansatz Brustbein-Schlüsselbein — Achse des Humerus  | 12                 |             | 1.04   | 12.9        | 71.2           |                |                |                  |
| 12z | Schulter in z            | Achse des Humerus links — rechts  | 12z                |             |        | 25.9        |                |                |                |                  |
| 13  | Brustkorb in y           | C7-T1 — T12-L1 und Zwerchfell   | 18                 | 21.6        | 0.92   | 16.3        | 82.0           |                |                |                  |
| 13z | Brustkorb in z           | Brustkorbbreite   | 13z                |             |        | 17.4        | 50.0           |                |                |                  |
| 14  | Bauch                    | T12-L1 und Zwerchfell — L4-L5   | 18                 | 13.9        |        | 7.9         | 44.0           |                |                |                  |
| 15  | Becken in y              | L5-L5 — großer Rollhügel des Femur  | 18                 | 14.2        |        | 4.6         | 10.5           |                |                |                  |
| 15z | Becken in z              | großer Rollhügel des Femur links — rechts   | 15z                |             |        | 19.1        | 50.0           |                |                |                  |
| 16  | Brust+Bauch              | C7-T1 — L4-L5   | 18                 | 35.5        |        | 24.2        | 63.0           |                |                |                  |
| 17  | Bauch+Becken             | T12-L1 und Zwerchfell — großer Rollhügel des Femur  | 18                 | 28.1        | 1.01   | 12.5        | 27.0           |                |                |                  |
| 18  | Rumpf=Brust+Bauch+Becken | Vertiefung des Humerus — großer Rollhügel des Femur   | 18                 | 49.7        | 1.03   | 28.8        | 50.0           | 50.8           | 71.3           | 8.2              |
| 19  | Stamm=Rumpf+Kopf         | großer Rollhügel des Femur — Ohrkanal   | 18                 | 57.8        |        | 40.6        | 66.0           | 50.3           | 83.0           | 8.3              |
| 20  | HAT1 = Rumpf+Kopf+Arme   | großer Rollhügel des Femur — Ohrkanal   | 18                 | 67.8        |        | 28.8        | 62.6           | 49.6           | 79.9           | 8.4              |
| 21  | HAT2 = Rumpf+Kopf+Arme   | großer Rollhügel des Femur — Ohrkanal<br>$l_{Bezi}$ = großer Rollhügel des Femur — mittlere Rippe | ↗                  | 67.8        |        | 15.8        | 114.2          | 90.3           | 145.6          | 8.4              |

**Tabelle 3.6:** Daten der Körpersegmente nach (Winter 1990) sowie Maße für Zylinder nach (Jäger, Luttmann et al. 1991), vgl. Bild 3.3, 3.5 – gemäß Segmentdefinitionen nach Bild 3.6.

Legende: C: cervicales (Halswirbel), T: thoracicae (Brustwirbeln), L: lumbales (Lendenwirbeln)

BH = Körpergröße, z.B. [m],

BM = Körpermasse z.B. [kg]

$l_{Bezi}$  [m] = Segment-Bezugsgröße für Massenmittelpunkt und Massenträgheitsradien ergibt sich aus  $l_i$  der angegebenen Zeilennummer(n).

$\bar{m}_i$  [%] = auf BM bezogene Segmentmasse,  $\rho$  [kg/dm<sup>3</sup>] = Dichte des Segments

$\bar{l}_i$  [%] = auf BH bezogene Segmentlänge

$\bar{l}_{Si}$  [%] = auf  $l_{Bezi}$  bezog. Massenmittelpunktsabstand in y-Achse (bez. Gelenkpunkt proximal)

$\bar{l}_{Si}$  [%] = auf  $l_{Bezi}$  bezog. Trägheitsradius um z-Achse des Segments (bez.  $S_i$ )

$\bar{l}_{Pi}$  [%] = auf  $l_{Bezi}$  bezog. Trägheitsradius um z-Achse des Segments (bez. Gelenkpunkt proximal)

$\bar{r}_{zyli}$  [%] = auf BH bezogener Radius für eine zylindrische Darstellung um die Längsachse.

===== H U B O D A =====  
 Programm zu Berechnung der Massengeometrie des Menschen  
 Version 2.0 - 10.05.2003  
 Entwickelt von Frank und Oskar Wallrapp, 82234 Wessling  
 im Rahmen der Vorlesung Biomechanik II an der FHM-FB06  
 Skalierte Werte  $mi\_$ ,  $li\_$ ,  $lSi\_$ ,  $iSi\_$  in '%' nach Winter 1990,  $rzyli\_$  nach Jäger 1992

Gebe die Masse in [kg] und die Größe in [m] ein

69 1.733

Körpermasse BM = 69.000 kg, Körpergröße BH = 1.733 m

Gebe die Koordinatenachse y oder z fuer Vertikalachse ein (y/z) (x zeigt stets in Laufrichtung)

y

x = Sagitalachse, y = Vertikalachse, z = transversale oder horizontale Achse

Folgende Gleichungen werden ausgewertet:

Segmentmasse  $mi = mi\_ * BM / 100$

Segmentlaenge  $li = li\_ * BH / 100$

Radius fuer Zylinderdarstellung in Laengsrichtung  $rzyli = rzyli\_ * BH / 100$

Schwerpkt bez. proximalem Gelenkpunkt  $lSi = lSi\_ * li / 100$

Trägheitsradius bez. Schwerpkt.  $iSi = iSi\_ * li / 100$

Massenträgheitsmoment bez. Si um x  $ISxx=zz = iSi^2 * mi$

Massenträgheitsmoment bez. Si um y  $ISyy = rzyli^2 * mi / 2$

Massenträgheitsmoment bez. Si um z  $ISzz=zyli = (rzyli^2 + li^2/3) * mi / 4$

Trägheitsradius bez. proximalem Gelenkpunkt  $iPi = \sqrt{iSi^2 + lSi^2} = iPi\_ * li / 100$

Massenträgheitsmoment bez. proximalem Gelenkpunkt um z  $IPzzi = iPi^2 * mi$

Tabelle 1 für Massen und Längen im globalen Koordinatensystem x-y-z

| Nr. Segment              | Masse<br>$mi\_$ | $mi$ [kg] | Segm.Laengen<br>$li\_$ | $li$ [m] | prox. Schwerkt.<br>$lSi\_$ | $lSi$ [m] | Zylinderradius<br>$rzyli\_$ | $rzyli$ [m] |
|--------------------------|-----------------|-----------|------------------------|----------|----------------------------|-----------|-----------------------------|-------------|
| 1x Fuß                   | 1.45            | 1.000     | 15.20                  | 0.263    | 15.80                      | 0.0416    | 0.00                        | 0.0000      |
| 1z Fuß                   | 1.45            | 1.000     | 5.50                   | 0.095    | 0.00                       | 0.0000    | 0.00                        | 0.0000      |
| 1y Fuß                   | 1.45            | 1.000     | 3.90                   | 0.068    | 66.70                      | 0.0451    | 1.90                        | 0.0329      |
| 2y Untersch              | 4.65            | 3.209     | 24.60                  | 0.426    | 43.30                      | 0.1846    | 3.30                        | 0.0572      |
| 3y Obersch               | 10.00           | 6.900     | 24.50                  | 0.425    | 43.30                      | 0.1838    | 5.00                        | 0.0867      |
| 4y Fuß+U.Sch             | 6.10            | 4.209     | 28.50                  | 0.494    | 60.60                      | 0.2583    | 0.00                        | 0.0000      |
| 5y Bein=1+2+3            | 16.10           | 11.109    | 53.00                  | 0.918    | 44.75                      | 0.3808    | 0.00                        | 0.0000      |
| 6y Hand                  | 0.60            | 0.414     | 10.80                  | 0.187    | 50.60                      | 0.0947    | 1.60                        | 0.0277      |
| 7y Unterarm              | 1.60            | 1.104     | 14.50                  | 0.251    | 43.00                      | 0.1081    | 2.30                        | 0.0399      |
| 8y Oberarm               | 2.80            | 1.932     | 18.80                  | 0.326    | 43.60                      | 0.1421    | 2.90                        | 0.0503      |
| 9y Hand+U.Arm            | 2.20            | 1.518     | 25.30                  | 0.438    | 68.20                      | 0.1885    | 0.00                        | 0.0000      |
| 10y Arm =6+7+8           | 5.00            | 3.450     | 44.10                  | 0.764    | 53.00                      | 0.3059    | 0.00                        | 0.0000      |
| 11y Kopf+Hals            | 8.10            | 5.589     | 11.80                  | 0.204    | 100.00                     | 0.2045    | 4.40                        | 0.0763      |
| 12y Schulter             | 0.00            | 0.000     | 12.95                  | 0.224    | 71.20                      | 0.1598    | 0.00                        | 0.0000      |
| 13z Brustk.              | 21.60           | 14.904    | 17.40                  | 0.302    | 0.00                       | 0.0000    | 0.00                        | 0.0000      |
| 13y Brustk.              | 21.60           | 14.904    | 16.30                  | 0.282    | 82.00                      | 0.4093    | 0.00                        | 0.0000      |
| 14y Bauch                | 13.90           | 9.591     | 7.90                   | 0.137    | 44.00                      | 0.2196    | 0.00                        | 0.0000      |
| 15z Becken               | 14.20           | 9.798     | 19.10                  | 0.331    | 0.00                       | 0.0000    | 0.00                        | 0.0000      |
| 15y Becken               | 14.20           | 9.798     | 4.60                   | 0.080    | 10.50                      | 0.0524    | 0.00                        | 0.0000      |
| 16y Brust+Bch.           | 35.50           | 24.495    | 24.20                  | 0.419    | 63.00                      | 0.3144    | 0.00                        | 0.0000      |
| 17y Bauch+Beck           | 28.10           | 19.389    | 12.50                  | 0.217    | 27.00                      | 0.1348    | 0.00                        | 0.0000      |
| 18y Rumpf =<br>13+14+15  | 49.70           | 34.293    | 28.80                  | 0.499    | 50.00                      | 0.2496    | 8.20                        | 0.1421      |
| 19y Stamm =<br>11+18     | 57.80           | 39.882    | 40.60                  | 0.704    | 66.00                      | 0.3294    | 8.30                        | 0.1438      |
| 20y HAT 1 =<br>19+(2*10) | 67.80           | 46.782    | 28.80                  | 0.499    | 62.60                      | 0.3124    | 8.40                        | 0.1456      |
| 21y HAT 2 =<br>19+(2*10) | 67.80           | 46.782    | 15.80                  | 0.274    | 114.20                     | 0.3127    | 8.40                        | 0.1456      |
| 22y Gesamt               | 100.00          | 69.000    | 100.00                 | 1.733    | 0.00                       | 0.0000    | 0.00                        | 0.0000      |

Tabelle 2 für Massenträgheitsmomente in [kgm<sup>2</sup>] im globalen Koordinatensystem

| Nr. Segment  | $iSi\_$ | $iSi$ [m] | $ISxx=zz$ | $ISyyi$ | $ISzz=zyli$ | $iPi\_$ | $iPi$ [m] | $IPzzi$ |
|--------------|---------|-----------|-----------|---------|-------------|---------|-----------|---------|
| 1 Fuß-x      | 47.50   | 0.1251    | 0.01566   | 0.00606 | 0.00606     | 52.90   | 0.1394    | 0.01943 |
| 2 Untersch   | 30.20   | 0.1287    | 0.05318   | 0.00525 | 0.05122     | 52.79   | 0.2251    | 0.16252 |
| 3 Obersch    | 32.30   | 0.1371    | 0.12977   | 0.02590 | 0.11661     | 54.02   | 0.2294    | 0.36299 |
| 4 Fuß+U.Sch  | 41.60   | 0.1773    | 0.13238   | 0.01130 | 0.08556     | 73.50   | 0.3134    | 0.41331 |
| 5 Bein=1+2+3 | 32.65   | 0.2778    | 0.85744   | 0.03721 | 0.78098     | 55.39   | 0.4714    | 2.46816 |
| 6 Hand       | 29.70   | 0.0556    | 0.00128   | 0.00016 | 0.00129     | 58.67   | 0.1098    | 0.00499 |
| 7 Unterarm   | 30.30   | 0.0761    | 0.00640   | 0.00088 | 0.00625     | 52.60   | 0.1322    | 0.01929 |
| 8 Oberarm    | 32.20   | 0.1049    | 0.02126   | 0.00244 | 0.01831     | 54.20   | 0.1766    | 0.06025 |
| 9 Hand+U.Arm | 46.80   | 0.1176    | 0.02099   | 0.00104 | 0.03086     | 82.71   | 0.2078    | 0.06558 |
| 10 Arm=6+7+8 | 36.80   | 0.2124    | 0.15560   | 0.00348 | 0.16792     | 64.52   | 0.3724    | 0.47834 |
| 11 Kopf+Hals | 49.50   | 0.1012    | 0.05727   | 0.01625 | 0.05520     | 111.58  | 0.2282    | 0.29099 |
| 18 Rumpf     | 50.80   | 0.2535    | 2.20452   | 0.34626 | 1.77002     | 71.28   | 0.3558    | 4.34016 |
| 19 Stamm     | 50.30   | 0.2510    | 2.51359   | 0.36251 | 2.06837     | 82.98   | 0.4142    | 6.84119 |
| 20 HAT 1     | 49.60   | 0.2476    | 2.86698   | 0.36251 | 2.43795     | 79.87   | 0.3986    | 7.43375 |
| 21 HAT 2     | 90.30   | 0.2473    | 2.86000   | 0.36251 | 2.43795     | 145.59  | 0.3986    | 7.43427 |

**Tabelle 3.7** Daten der Körpersegmente nach Tab. 3.6 für BH = 1.733 m und BM = 69 kg.

**Übung 3.1:** Bestimme die Daten von Kopf und Hals für  $BH = 1.8 \text{ m}$  und  $BM = 80 \text{ kg}$ .

**Übung 3.2:** Nenne Gründe, warum die realen Daten von skalierten Werten erheblich abweichen können?



### 3.2.3 Experimentelle Bestimmung von Segmentdaten

Die **Abmessungen der Segmente** sowie die Festlegung der notwendigen Marker für Gelenkankopplungen und Sensoren können *in vivo* durch Anlegen von Meßgeräten bestimmt werden (mechanisch oder optisch).

Auch können hierzu Röntgenaufnahmen herangezogen werden.

Zur Bestimmung der **Masse und des Massenmittelpunktes** kann die Waage nur im Falle von Leichtenteilen verwendet werden.

Auch kann man über die Wasserverdrängung und der Dichte auf die Masse schließen.

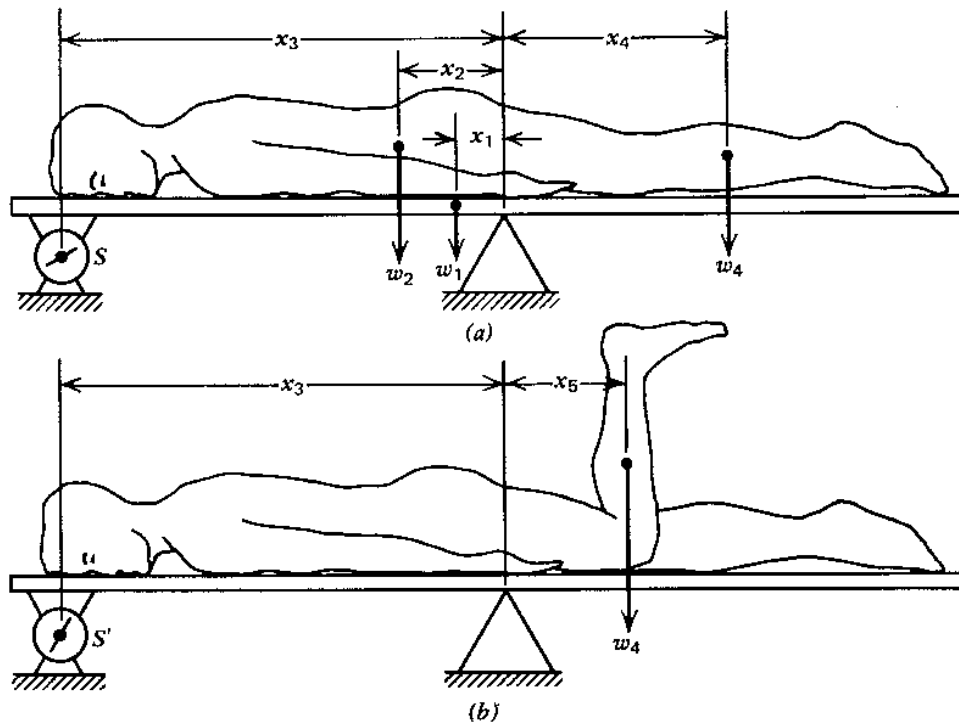
Bestimmungen am lebenden Menschen sind möglich über

- a) mechanisches Auswiegen auf der Pendelwaage, Bild 3.11.
- b) Bildauswertung bei der Computertomographie (CT) oder Kernspintomographie (MRI), Bild 3.12

Zur Bestimmung der **Massenträgheitsmomente** läßt sich der Pendelversuch, auch *in vivo* anwenden, siehe Bild 3.14.

Außerdem läßt sich aus den Schichtaufnahmen von CT- und MRI-Bilder ein Volumenmodell aufbauen (Bild 3.13) und mit Hilfe der Dichteverhältnisse auf die Massenträgheitsmomente eines Segmentes schließen.

Heute stehen Computerprogramme zur Verfügung (z.B. AMIRA), um CT- und MRI-Bilder digital zu erfassen und Volumenmodelle und Dichteverteilungen zur Bestimmung der Massendaten und zur Erstellung von Finite-Elemente-Strukturen aufzubauen, siehe (Sackel 2001).



| Schwerpunkt des Körpers  | Gewicht des Unterschenkels mit Fuß   |
|--|--|
| <p>Geg: oberes Bild (Körper gestreckt)</p> <p><math>w_1</math> = Gewicht der Liege</p> <p><math>x_1</math> = Schwerpunkt der Liege</p> <p><math>w_2</math> = Gewicht des Körpers</p> <p><math>x_3</math> = Position der Kraftmeßdose</p> <p><math>S</math> = Druckkraft</p> <p>Lös:</p> $x_1 w_1 + x_2 w_2 - x_3 S = 0$ <p>Schwerpunkt des Körpers vom Drehpunkt</p> $x_2 = \frac{S x_3 - w_1 x_1}{w_2}$ | <p>Geg: oberes und unteres Bild</p> <p><math>w_1</math> = Gewicht der Liege</p> <p><math>x_1</math> = Schwerpunkt der Liege</p> <p><math>w_2</math> = Gewicht des Körpers – ohne Unterschenkel</p> <p><math>x_2</math> = Schwerpunkt des Körpers – ohne Unterschenkel</p> <p><math>x_3</math> = Position der Kraftmeßdose</p> <p><math>x_4</math> = Schwerpunkt U.Schenkel und Fuß, ausgestreckt</p> <p><math>x_5</math> = Schwerpunkt U.Schenkel und Fuß, angewinkelt</p> <p><math>S</math> = Druckkraft, wenn U.Sch. ausgestreckt</p> <p><math>S'</math> = Druckkraft, wenn U.Sch. angewinkelt</p> <p>Lös:</p> <p>(i) <math>x_1 w_1 + x_2 w_2 - x_3 S - x_4 w_4 = 0</math> (o. Bild)</p> <p>(ii) <math>x_1 w_1 + x_2 w_2 - x_3 S' - x_5 w_4 = 0</math> (u. Bild)</p> <p>aus (i) – (ii) --&gt;</p> <p>Gewicht des Unterschenkels mit Fuß</p> $w_4 = \frac{(S' - S) x_3}{(x_4 - x_5)}$ |

Bild 3.11: Experimentelle Bestimmung von Massen und -Mittelpunkten von Körperteilen (Winter 1990)

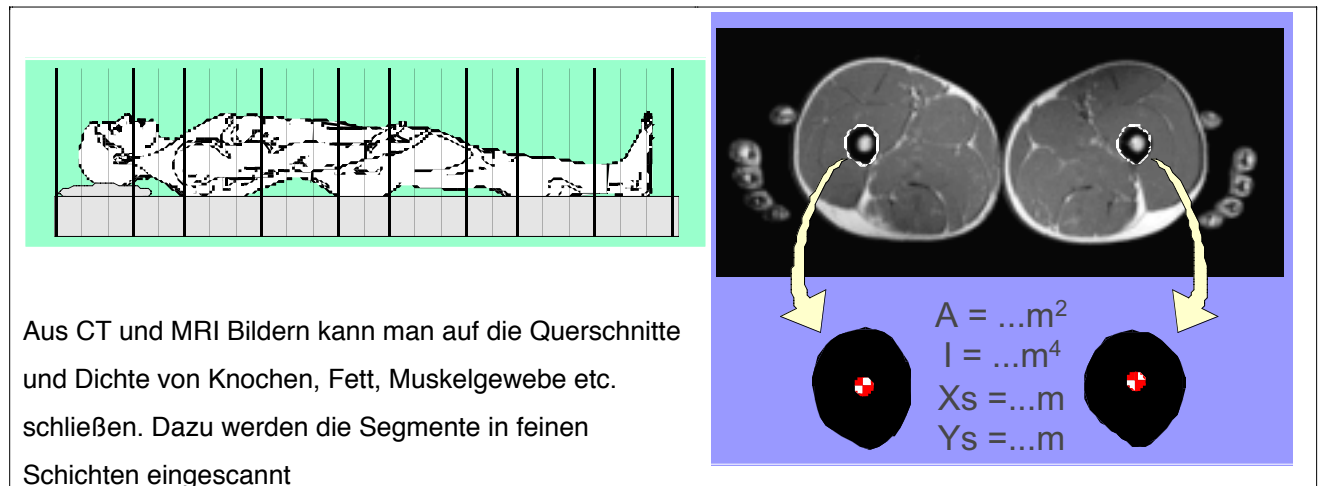


Bild 3.12: Durchführung einer Computertomographie und Auswertung der Bildinformationen für Massendaten.

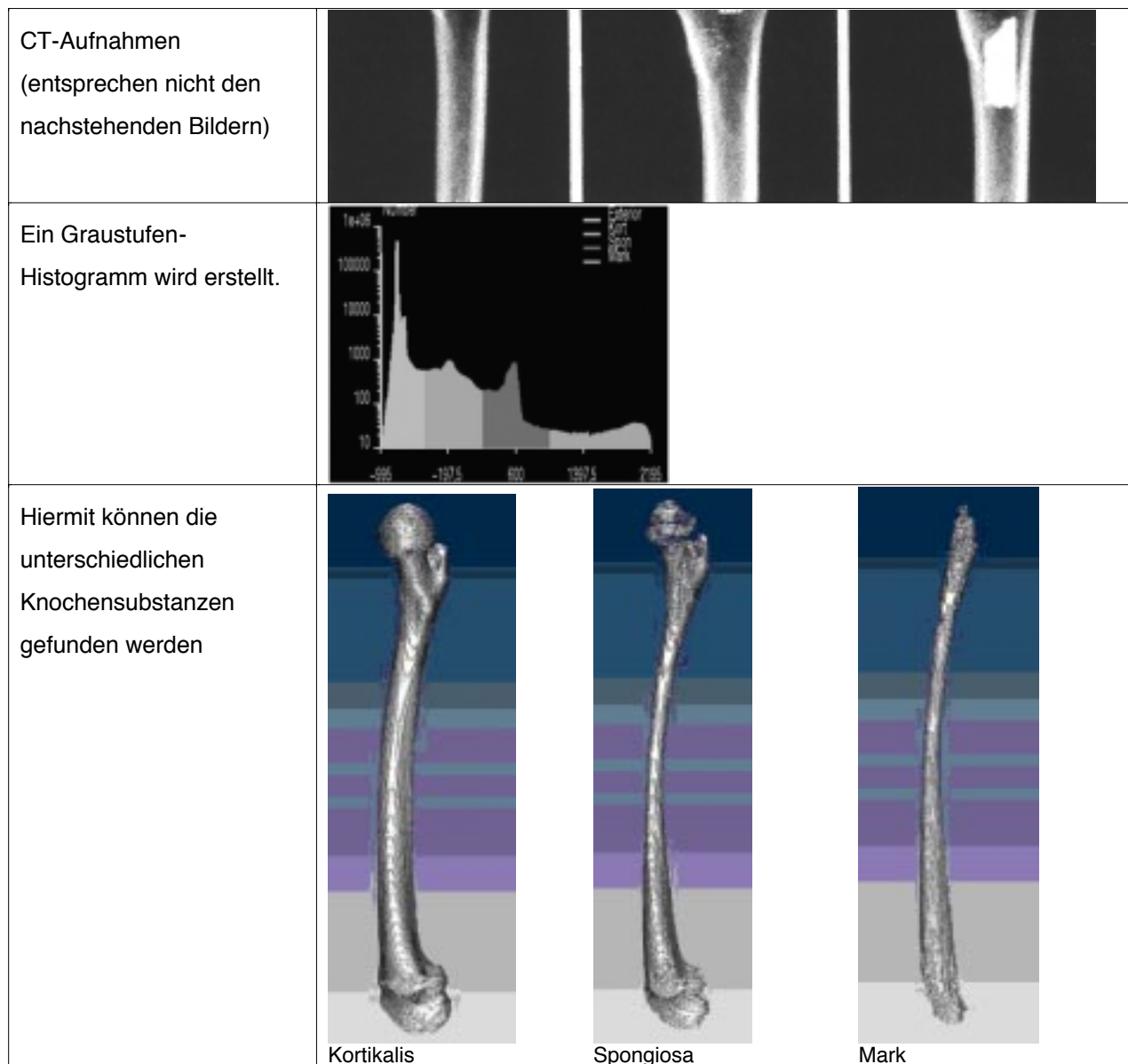
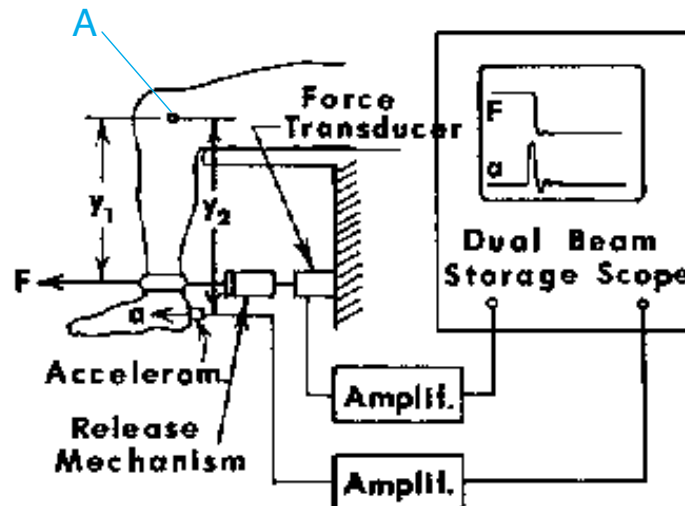


Bild 3.13: CT-Bilder und deren Auswertung mit AMIRA für ein FE-Modell des Femurknochen und dessen Aufteilung, (Sackel 2001)



### Massenträgheitsmoment von Unterschenkel und Fuß bez. Kniegelenk

Geg:  $y_1$  = Abstand Anregungskraft [m]

$y_2$  = Abstand Beschleunigungsmesser [m]

$a$  = Linearbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

$F$  = Anregungskraft [N]

Lös:

Drehmoment um A:  $M_A = F y_1$

Winkelbeschleunigung:  $\alpha_A = a / y_2$

Eulergleichung:  $I_A \alpha_A = M_A$

Massenträgheitsmoment um A:  $I_A = M_A / \alpha_A = F y_1 y_2 / a$

Bild 3.14: Experimentelle Bestimmung von Massenträgheitsmomenten (Winter 1990)

### 3.2.4 Berechnung der Massendaten zusammengesetzter Körper

Im vorherigem Abschnitt wurden die Massendaten einzelner Segmente vermessen. Mit Hilfe der Mechanik lassen sich aus den Segmentdaten die Massendaten von Körpern, bestehend aus mehreren Segmenten, berechnen. Dazu werden die Integrale für Masse, Schwerpunkt und Massenträgheitsmatrix in (2.22), (2.23), (2.34) und (2.35) mit der infinitesimalen Größe  $dm$  durch endliche Körperteile  $\Delta m$  ersetzt.

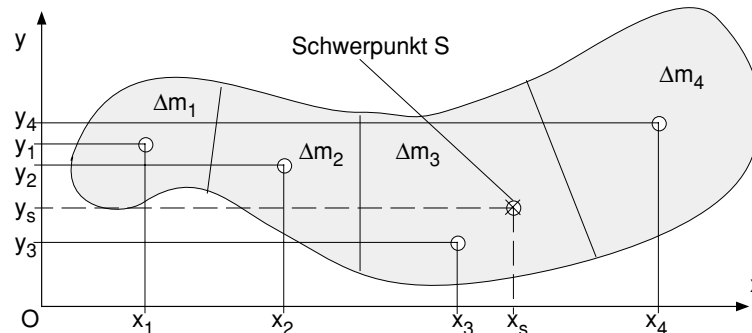


Bild 3.15: Körper bestehend aus 4 Einzelteilen

Es gilt somit für einen Körper nach Bild 3.15 mit  $n = 4$  Körperteilen:

| Betrachtung  | kontinuierlich                   | diskret                       |
|--------------|----------------------------------|-------------------------------|
| <b>Masse</b> | $m = \int_V \rho dV = \int_B dm$ | $m = \sum_{k=1}^n \Delta m_k$ |

(3.13)

**Massenmittelpunkt bez. O** (Elemente des Vektors  $\mathbf{r}_{Si}$ ), vgl. Abschnitt 2.1.1

$$x_s = \frac{1}{m} \int_V \rho x dV = \frac{1}{m} \int_V x dm \quad x_s = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n x_k \Delta m_k \quad (3.14)$$

$$y_s = \frac{1}{m} \int_V \rho y dV = \frac{1}{m} \int_V y dm \quad y_s = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n y_k \Delta m_k \quad (3.15)$$

$$z_s = \frac{1}{m} \int_V \rho z dV = \frac{1}{m} \int_V z dm \quad z_s = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n z_k \Delta m_k \quad (3.16)$$

Es bedeuten hierin:

$V$  = Volumen,  $\rho$  = Dichte,  $B$  = Bereich,  $n$  = Zahl der diskreten Teile mit Masse  $\Delta m_k$  am Ort  $x_k, y_k, z_k$  und Massenträgheitsmomenten  $I_{Skxx}, I_{Skyy}, I_{Skzz}, I_{Skxy}, I_{Skxz}, I_{Skyz}$

$m$  = Masse,  $x_s, y_s, z_s$  = Koordinaten des Massenmittelpunkts (Schwerpunkts) bez. Ursprung O

$I_{Oxx}, I_{Oyy}, I_{Ozz}$  = Haupt-Massenträgheitsmomente um x-, y-, z-Achse bez. Ursprung O

$I_{Oxy}, I_{Oxz}, I_{Oyz}$  = Deviations-Massenträgheitsmomente bez. Ursprung O.

| Betrachtung | kontinuierlich | diskret |
|-------------|----------------|---------|
|-------------|----------------|---------|

**Massenträgheitsmomente bez. O** (Elemente der Matrix  $\mathbf{I}_{O_i}$ ), vgl. Abschnitt 2.1.1

$$I_{O_{xx}} = \int_V (y^2 + z^2) dm \quad I_{O_{xx}} = \sum_{k=1}^n \left( \Delta I_{S_{kxx}} + (y_k^2 + z_k^2) \Delta m_k \right) \quad (3.17)$$

$$I_{O_{yy}} = \int_V (x^2 + z^2) dm \quad I_{O_{yy}} = \sum_{k=1}^n \left( \Delta I_{S_{kyy}} + (x_k^2 + z_k^2) \Delta m_k \right) \quad (3.18)$$

$$I_{O_{zz}} = \int_V (x^2 + y^2) dm \quad I_{O_{zz}} = \sum_{k=1}^n \left( \Delta I_{S_{kzz}} + (x_k^2 + y_k^2) \Delta m_k \right) \quad (3.19)$$

$$I_{O_{xy}} = - \int_V x y dm \quad I_{O_{xy}} = \sum_{k=1}^n \left( \Delta I_{S_{kxy}} - x_k y_k \Delta m_k \right) \quad (3.20)$$

$$I_{O_{xz}} = - \int_V x z dm \quad I_{O_{xz}} = \sum_{k=1}^n \left( \Delta I_{S_{kxz}} - x_k z_k \Delta m_k \right) \quad (3.21)$$

$$I_{O_{yz}} = - \int_V y z dm \quad I_{O_{yz}} = \sum_{k=1}^n \left( \Delta I_{S_{kyz}} - y_k z_k \Delta m_k \right) \quad (3.22)$$

**Umrechnung der Massenträgheitsmomente bez. O auf den Massenmittelpunkt  $S_i$  des Körpers**

Mit dem Schwerpunktsabstand  $\mathbf{r}_S = (x_S, y_S, z_S)^T$  und Massenträgheitsmatrix  $\mathbf{I}_O$  bez. O folgen die Elemente der Massenträgheitsmatrix  $\mathbf{I}_S$  bez.  $S_i$

$$I_{S_{xx}} = I_{O_{xx}} - (y_S^2 + z_S^2) m \quad (3.24)$$

$$I_{S_{yy}} = I_{O_{yy}} - (x_S^2 + z_S^2) m \quad (3.25)$$

$$I_{S_{zz}} = I_{O_{zz}} - (x_S^2 + y_S^2) m \quad (3.26)$$

$$I_{S_{xy}} = I_{O_{xy}} + x_S y_S m \quad (3.27)$$

$$I_{S_{xz}} = I_{O_{xz}} + x_S z_S m \quad (3.28)$$

$$I_{S_{yz}} = I_{O_{yz}} + y_S z_S m \quad (3.29)$$

**Beachte: Bezüglich Massenmittelpunkt sind die Hauptträgheitsmomente am kleinsten,  
aber immer noch  $> 0$**

**Übung 3.3:**

Bestimme die Masse, den Massenmittelpunkt und die Massenträgheitsmomente des Beines (Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel), wenn eine Gesamtmasse  $M = 75 \text{ kg}$  und Körperhöhe  $H = 1.80 \text{ m}$  angenommen werden und der Ursprung der Basis im Hüftgelenk  $M_p = M_3$  sein soll. Verwende Tab. 3.6.

- a) Alle Segmente sind nicht verdreht.
- b) Die Stellung der Segmente beträgt  $\gamma_{10} = 0^\circ$ ,  $\gamma_{21} = 0^\circ$ ,  $\gamma_{32} = 90^\circ$ .

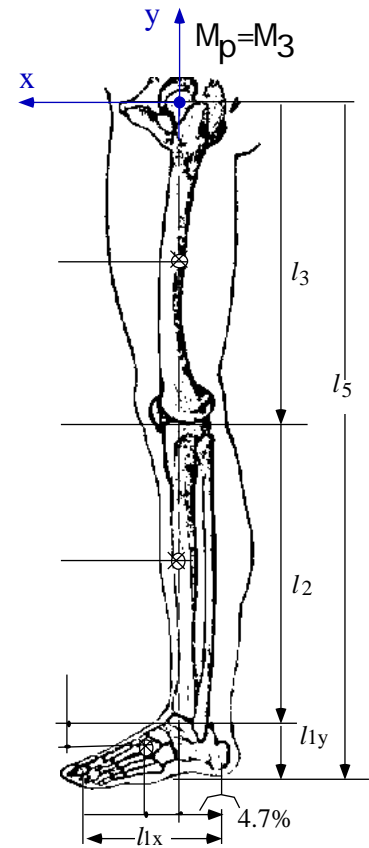
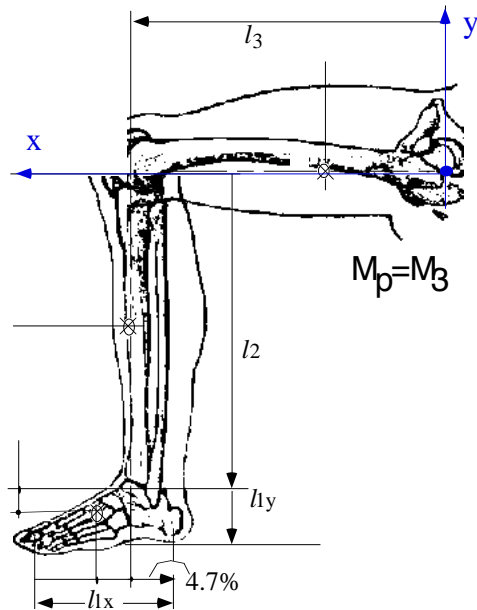


Bild 3.16: Abmessungen Bein

Es empfiehlt sich, ein Excel File zu erstellen.

### 3.3 Festlegung der Gelenke und deren Bewegungsbereiche

Um die technischen Gelenke des Mensch-Modells festzulegen, können wir uns selbst betrachten oder Bild 3.6 zur Hilfe nehmen.

Einige der Gelenke sind so geformt, dass sie direkt durch technische Gelenke (Tab. 2.2) abzubilden sind. Das betrifft vor allem das Hüftgelenk und das Schultergelenk. Für das Ellenbogengelenk und das Kniegelenk sind spezielle Gelenke aus Tab. 2.1 zu wählen.

Schwieriger wird die Betrachtung des Handgelenks und des Sprunggelenks, siehe Bild 3.17. Aus der Form der Knochen sind die Bewegungsmöglichkeiten dieser Gelenke nicht zu erkennen. Sie müssen durch genaue Beobachtung der Bewegungsmöglichkeiten festgelegt werden. Das gilt auch für Becken-, Rücken-, Kopf- und Schulterblattbewegungen.

Die räumlichen Gelenke kann man für viele Fragestellungen durch einfachere Gelenke  
– vielfach durch Drehgelenke – ersetzen.

Für die Gelenke sind die **Marker  $P_g$  und  $Q_g$  auf den Körpersegmenten  $i$  und  $j$**  zu definieren (Bild 2.8).

Diese sind in der Regel die distalen und proximalen Punkte der Segmente, vgl. Abschn. 3.2.1, Bild 3.9.

**Merke: Lege die Marker  $P_g$  und  $Q_g$  so fest, dass die Gelenkkoordinaten und Zwangskräfte in der gewünschten Richtung wirken, vgl. Bild 2.8!**

Tabelle 3.8 zeigt die in Bild 3.6 festgelegten Gelenke mit Idealisierungen und Bewegungsbereiche.

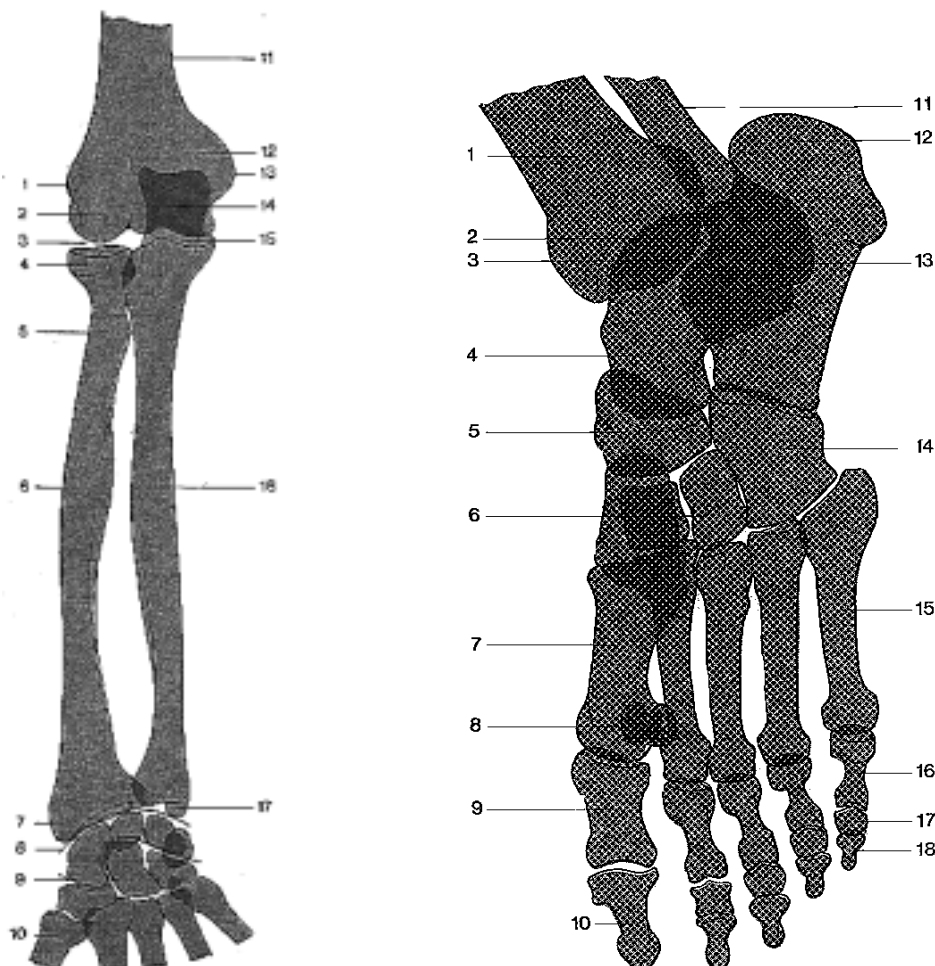


Bild 3.17: Das Hand- und Ellenbogengelenk sowie das Sprunggelenk



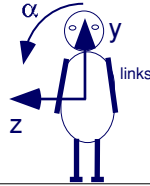
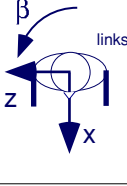
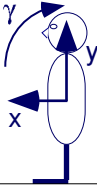
|     |  | Gelenkidealisierung |                      | Bewegungsbereiche<br>(Leonhardt, Tillmann et al. 1987)                             |   |   |
|-----|--|---------------------|----------------------|--|---|---|
| Nr. | Beschreibung   | Gelenktyp 1         | Gelenktyp 2          | um x-Achse   | um y-Achse  | um z-Achse  |
|     |  |                     |                      |  |  |  |
| ①   | Sprunggelenk<br>(Talus bez. Tibia )                                      | Dreh D (z)          |                      |  |   |   |
| ②   | Kniegelenk<br>(Tibia bez. Femur )  | Dreh D (z)          |                      |  |   |   |
| ③   | Hüftgelenk<br>(Femur bez. Os ilium)                                      | Dreh D (z)          | Kugelgelenk<br>$D_3$ | –Abduktion(40)<br>$< \alpha <$<br>Adduktion(25°)                                   | rechts:<br>–Außenrot(40)<br>$< \beta <$ Innenrot(45)<br>links:<br>umgekehrt         | –Extension(15)<br>$< \gamma <$<br>Flexion(135°)                                     |
| ④   | Handgelenk<br>(Hand bez. Radius )  | Dreh D (x)          |                      |  |   |   |
| ⑤   | Ellenbogengelenk<br>(Ulna bez. Humerus:<br>$D_z$ ;<br>Radius bez Humerus | Dreh D (z)          |                      |  |   |   |
| ⑥   | Schultergelenk<br>(Humerus bez.<br>Schulterpfanne)                       | Dreh D (z)          |                      |  |   |   |
| ⑦   | Kopfgelenk<br>(Kopf +. Hals )<br>bez. Brustkorb                          | Dreh D (z)          |                      |  |   |   |
| ⑧   | Becken-Bauch<br>& Brustgelenk<br>(Brustwirbel bez.<br>Lendenwirbel )     | Dreh D (z)          |                      |  |   |   |

Tabelle 3.8: Gelenke des menschlichen Bewegungsapparates nach Bild 3.6 mit Gelenkidealisierung und Bewegungsbereiche.

**Übung 3.4:** Trage in Tabelle 3.8 die fehlenden Angaben ein.

### 3.4 Die Muskulatur in MKS-Modell

Die Beschreibung der Muskulatur und deren Modellgesetze stellen die schwierigste Aufgabe der Modellbildung des Menschen dar. Die Gründe hierfür sind:

- ◇ Je nach Körperhaltung sind unterschiedliche Muskeln beteiligt (Bild 3.18)
- ◇ Die Vielzahl der Muskeln: Am Bein sind 41 Muskeln aktiv, um drei Segmente (Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel) bezüglich Rumpf zu bewegen (Bild 3.19).
- ◇ Je nach Bewegung sind Muskeln beteiligt, die sich gegenseitig verspannen, siehe z.B. Bild 2.11 - Strecker und Beuger sind gleichzeitig aktiviert.
- ◇ Ein Muskel ist vielfach über mehrere Fasern (Köpfe) an die Skelettstruktur angewachsen und verläuft nicht axial zwischen zwei Anlenkpunkten (Bild 2.11).
- ◇ Kraftgesetze sind hochgradig nichtlinear und aktiv, d.h. vom zentralen Nervensystem (ZNS) abhängig

Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 gezeigt, sind Modellvereinfachungen der Muskeln am Skelett erforderlich. Desweiteren sind Krafterelemente der Muskel detaillierte Modellgesetze oder resultierende Gelenkmomente notwendig. Siehe hierfür Kap. 4.

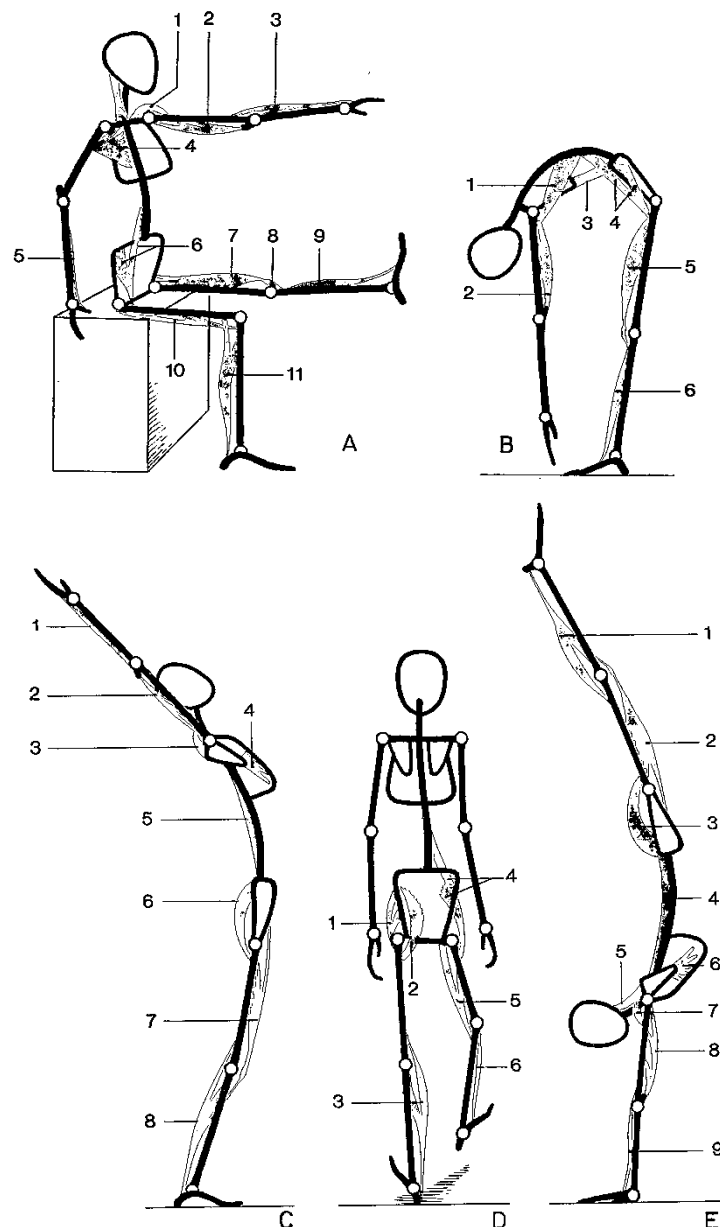


Bild 3.18: Muskelfunktionen bei unterschiedlichen Haltungen des Körpers (Faller 1967)

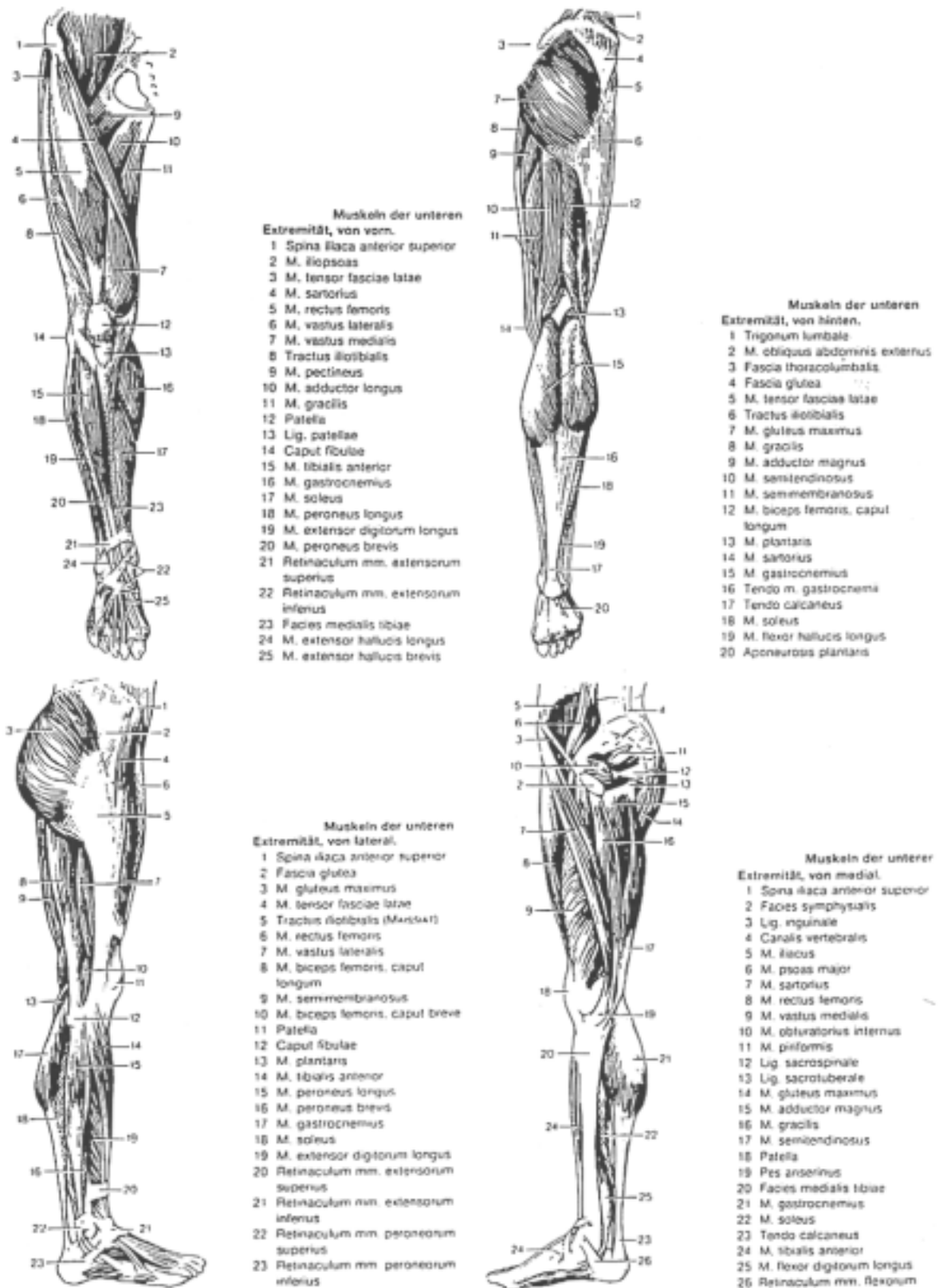


Bild 3.19: Muskeln der unteren Extremitäten in verschiedenen Ansichten (Graumann et al.)

**Übung 3.5:** Nenne weitere Erschwernisse bei der Modellbildung der Muskeln durch Kraftelemente.

