

INHALTSVERZEICHNIS

Kapitel I – Grundlagen und Konzepte

1	Was ist Biomechanik?	1	3.4	Bewegung im dreidimensionalen Raum	25
2	Faktoren, die die Bewegung eines Gelenks beeinflussen	3		Die Definition der helikoidalen Achse . . .	26
	Dreidimensionale Form der Gelenkflächen	3		Lokalisation und Orientierung der helikoidalen Achse	27
	Kapsulo-ligamentäre Strukturen	4		Beschreibung der helikoidalen Achse mit einem Schnittpunkt und zwei Winkeln	27
	Muskeln	4		Beschreibung der helikoidalen Achse mit zwei Schnittpunkten in zwei Ebenen .	29
	Schwerkraft	6		Berechnung der helikoidalen Achse und ihre Lage zum jeweiligen Gelenk. . .	29
	Innere Kräfte	6	3.5	Assoziierte Bewegungen	30
	Externe Kräfte	7			
3	Grundbegriffe der Kinematik der Gelenke	7	3.5.1	Praktisches Beispiel – Qualitative Analyse	31
3.1	Rotation und Translation	7	3.5.2	Quantitative Analyse.	34
	Translation	8		Idealfall	34
	Rotation	8		Komponentenverteilung	34
3.2	Rotation im zweidimensionalen Raum	9		Formale Beschreibung der Komponentenverteilung	35
3.2.1	Das Rotationszentrum	10		Anwendungsbeispiel am femorotibialen Gelenk	35
	Terminologie.	10	4	Beschreibungsmöglichkeiten einer dreidimensionalen Bewegung	36
	Definition.	10			
	Bestimmung des Rotationszentrums . . .	11	4.1	Gebräuchliche klinische Beschreibungsmethode	36
	Translation – Ein Sonderfall der Rotation .	13	4.2	Mathematische Bestimmung der Grundebenen	36
3.2.2	Diskretes Rotationszentrum versus momentanes Rotationszentrum	14	4.3	Gelenk-Koordinaten-System	38
3.2.3	Anhäufung von Rotationszentren . . .	18	4.4	Kardan-Winkel	42
3.2.4	Sequenzen von Rotationen bzw. Rotationen und Translationen	18	4.5	Euler-Winkel	42
	Fall 1 – Sequentielle Rotationen mit gleichem Rotationszentrum	18	4.6	Twist-Tilt-Methode	44
	Fall 2 – Sequentielle Rotationen mit verschiedenen Rotationszentren	18	4.7	Helikoidale Achse	44
	Fall 3 – Sequentielle Rotationen mit verschiedenen Rotationszentren, gleicher Amplitude und gegenläufigem Drehsinn .	20	4.8	Andere Methoden	46
	Fall 4 – Zerlegung einer Translation. . . .	20		Augenbewegungen	46
	Fall 5 – Rotation mit Translation.	20		Quaternions	46
	Fall 6 – Zerlegung einer Rotation	21	4.9	Schlussbemerkung	46
3.3	Freiheitsgrade	22			
	Kinematisch	22			
	Mechanisch	22			
	Klinische Relevanz.	25			

5	Referenzsysteme	47	9	Fehleranalyse in der Kinematik	72
5.1	Äußeres und inneres Referenzsystem	47	9.1	Methodisch bedingter Fehler	72
5.2	Unterscheidung der Bewegung eines Gelenkpartners von der Bewegung in einem Gelenk	47	9.2	Einfluss der Messfehler	74
6	Krümmung von Gelenkflächen	48		Messfehler	74
	Krümmung einer ebenen Kurve	48		Bewegungsamplitude	75
	Dreidimensionale gekrümmte Flächen	51		Zurückgelegte Distanz, Radienlänge und Radienwinkel	76
7	Arthrokkinematische Beschreibungen von Bewegungen	52		Virtuelle Deformation	77
7.1	Rollen und Gleiten	52	10	Grundlagen der Dynamik und Statik	78
7.1.1	Rollen	53		Definition	78
	Allgemeine Bestimmung des Rollens	53		Newton-Axiome	78
	Lage des Rotationszentrums beim Rollen	54		Kraft und Gewichtskraft	79
7.1.2	Gleiten	56		Darstellung von Kräften	79
7.1.3	Rollgleiten	56		Addition zweier nicht-paralleler Kräfte mit gleichem Angriffspunkt	80
	Bestimmung eines Roll-Gleit-Index über Gelenkflächenkrümmung und Rotationszentrum	56		Addition zweier nicht-paralleler Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten	81
	Analyse des Roll-Gleit-Index über Kontaktpunkte	58		Addition zweier paralleler Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten	81
7.2	Sonderfall der Translation	60		Addition von mehr als zwei Kräften	82
7.3	Beanspruchung der Knorpelflächen beim Gleiten und bei Translation	61		Das Drehmoment	83
7.4	Synthese: Der Bewegungsindex	62		Das Trägheitsmoment	85
7.5	Koaptation und Dekoaptation	65		Gleichgewichtsbedingungen	86
7.5.1	Winkel Gamma	65	11	Materialeigenschaften von biologischen Geweben	87
	Fall 1 – Gamma ist kleiner oder gleich 20°	65	11.1	Spannung und Dehnung	87
	Fall 2 – Gamma ist größer als 20°	66		Definition	87
7.5.2	Geschwindigkeitsvektor	66		Spannung	87
8	Versuch einer kinematischen Erklärung der Dysfunktion eines Gelenks	68		Dehnung	88
	Amplitude	68		Anmerkung	88
	Rotationszentrum	68		Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Hooke-Gesetz – Elastizitätsmodul	89
	Der Geschwindigkeitsvektor	69		Formen der Spannung	90
	Der Bewegungs-Index	70		Reaktionstypen auf Deformation	91
	Helikoidale Achse	70	11.2	Das Verhalten biologischer Materialien	91
	Schlussbemerkung	70	11.2.1	Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm biologischer Materialien	92
				Nicht-lineares Verhalten	92
				Quasi-lineares Verhalten und Reißgrenze	92
				Elastizitätsmodul	92
				Absorbierte Energie	92
				Vergleich linearen und nicht-linearen Materialverhaltens	94

11.2.2	Von der Biochemie über die Morphologie zur Biomechanik des Bindegewebes.	95		Formalisierung von Gelenkflächentypen	111
	Vorbemerkung.	95		Klassifikation von Ligamenten	112
	Organisation	95	12.1	Gelenkspiel	112
	Kollagen	95		Biomechanische Definition	113
	Grundsubstanz	98	12.2	Versuch einer funktionellen Klassifikation von Bändern	114
	Andere Moleküle	99	12.2.1	Gelenke, bei denen die Ebene der Ligamente mit der Bewegungsebene zusammenfällt	114
11.2.3	Viskoelastisches Verhalten von Geweben	99		Gekrümmte Gelenkflächen	114
	Kriechverhalten	101		Flache Gelenkflächen (planes Gelenk)	117
	Relaxations-Phänomen	102		Theoretisches Modell nach Huson.	118
	Das Hysteresis-Phänomen	102		Praktische Anwendung des Modells.	123
11.3	Das viskoelastische Verhalten beeinflussende Faktoren unter besonderer Berücksichtigung des Bindegewebes.	104	12.2.2	Gelenke, bei denen die Ebene der Ligamente rechtwinklig zur Bewegungsebene steht.	124
	Gewebeaufbau	104	12.2.3	Gelenke mit Kreuzbändern.	126
	Die Kraft selbst	104		Paralleles Pleuelstangensystem mit gleicher Stangenlänge	126
	Die Zeit.	104		Pleuelstangensystem mit ungleicher Stangenlänge	128
	Anspannungsgeschwindigkeit	104		Gekreuztes Pleuelstangensystem	128
	Vorgeschichte	106	12.2.4	Gelenke mit Bändern, die einen Drehpunkt darstellen	129
	Immobilisation.	106	12.2.5	Gelenke mit Bändern, die eine Gelenkfläche bilden	130
	Training und Mobilisation.	107	12.2.6	Bänder, die kein Gelenk überbrücken	130
	Art der myotensiven Technik.	108	12.3	Das Nockenwellen-Phänomen.	131
	Alter	108	12.4	Die exzentrische Bandinsertion.	133
	Temperatur	109	12.5	Die verriegelte Position	138
	Hormonelle Faktoren	109			
	Medikamente	110			
12	Bauprinzipien eines Gelenks.	111			
	Zur allgemeinen Bandfunktion	111			

Kapitel II – Das Becken

1	Einführung	139	2.3	Ligamente	146
1.1	Die Beckenregion als Funktionseinheit	139	2.3.1	Intrinsische Ligamente	146
				Anterior	146
1.2	Die Bewegungen des Beckenringes im Gesamten.	140		Posterior.	147
	In der Sagittalebene	141	2.3.2	Extrinsische Ligamente	148
	In der Frontalebene.	141		Das Lig. sacrotuberale	148
	In der Transversalebene	142		Das Lig. sacrospinale	150
2	Das Iliosakralgelenk.	142	2.4	Terminologie der Bewegungen im Iliosakralgelenk.	150
2.1	Knorpelbeschaffenheit und Knorpeldicke	143		Nutation	150
				Kontranutation	152
2.2	Morphologie der Gelenkflächen	144	2.5	Bewegungsstudien zum Iliosakralgelenk.	153

2.5.1	Alte Theorien	153
2.5.2	Klassische Theorien	153
2.5.3	Neuere Studien	154
2.5.4	Synthese	166
3	Das Pubisgelenk.	169
3.1	Gelenkflächen	169
3.2	Ligamente	169
3.3	Bewegungen	171
3.4	Beanspruchung	173
	Modell nach Kapandji	173
	Modell nach Pauwels	173
	Muskuläre Stabilisationsfaktoren	174

4	Das Sakrokokzygeal- gelenk	174
4.1	Gelenkflächen	174
4.2	Ligamente	174
4.3	Bewegungen	175
	In der Sagittalebene	175
	In der Frontalebene	176
5	Die Lenden-Becken- Schere	177
5.1	In der Sagittalebene	177
5.2	In der Frontalebene	180
5.3	In der Transversalebene	180
5.4	Epilog	181

Kapitel III – Das Hüftgelenk

1	Anatomische Grundlagen.	183
1.1	Entwicklung des Os coxae sowie des Acetabulums.	183
1.2	Die Form des Acetabulums und der Facies lunata	184
1.3	Das Labrum acetabulare	185
1.4	Die Form des Femurkopfes	186
1.5	Die Bänder des Hüftgelenks	187
2	Coxometrie	189
2.1	In der Frontalebene	189
2.2	In der Sagittalebene	192
2.3	In der Transversalebene	193
2.3.1	Anteversionswinkel des Femurs	193
2.3.2	Anteversionswinkel des Acetabulums.	194
3	Femurüberdeckung und mögliche klinische Konsequenzen	195
3.1	Expulsive Coxarthrose.	196
3.2	Protrusive (penetrierende) Coxarthrose	196
4	Größe und Kongruenz der Kontaktflächen.	197
4.1	Größe der Kontaktflächen	197
4.2	Kongruenz der Gelenkflächen	198

5	Auf das Hüftgelenk wirkende Kräfte.	202
5.1	Gleichgewichtsmodell für die Frontalebene im Einbeinstand	202
5.2	Experimentelle Daten	204
5.3	Kapsulo-ligamentäre Kräfte.	209
5.4	Muskuläre Funktionsanalyse	212
5.4.1	Drehmomentanalyse	212
5.4.2	Komponentenzerlegung	213
5.4.3	Muskelmodelle.	216
	Geraden-Modell	216
	Das Flächenmittelpunkt-Modell	216
5.5	Verhalten der Koaptationskomponente der Hüftadduktoren während der Bewegung.	220
5.6	Verhalten der Koaptationskomponente der Hüftabduktoren während der Bewegung.	222
5.7	Verhalten der Koaptationskomponente des M. iliopsoas während der Bewegung.	223
5.8	Zusammenfassung.	224

6	Die Verteilung der Belastungen	225	7.3	Abduktoren	229
7	Dreidimensionale Muskelfunktionen	228	7.4	Extensoren	229
7.1	Adduktoren	228	7.5	Außenrotatoren	230
7.2	Flexoren	228	7.6	Innenrotatoren	231
			7.7	Das Verhältnis der Rotatoren zueinander	231

Kapitel IV – Das Kniegelenk

1	Das femorotibiale Gelenk	238	1.3.3	Die freie axiale Rotation	268
1.1	Kinematik in der Sagittalebene	238		Achsenlage	268
	Vorbemerkung	238		Assoziierte Bewegungen bei freier Rotation	268
1.1.1	Allgemeine Kinematik des Rollgleitens	238		Einfluss der Hauptligamente	271
1.1.2	Kreuzbänder und Kondylenform	242		Vorderes Kreuzband und Konvexität des lateralen Tibiaplateaus	272
	Das Modell des gekreuzten Pleuelstangensystems	242		Die Rotatoren	272
	Die Krümmung des Femurkondylus	243	1.4	Die Menisken	274
1.1.3	Verhalten der Kreuzbänder während der Bewegung im Hinblick auf das Rotationszentrum	244	1.4.1	Morphologie, Insertionen, Beziehungen	274
1.1.4	Spezifisches Roll-Gleit-Verhalten für einen typischen Kondylus	246	1.4.2	Interner Aufbau	274
1.1.5	Rollgleitverhalten des lateralen und medialen Kondylus	249	1.4.3	Funktionen	276
1.1.6	Einfluss der Kreuzbänder auf Amplitude und Stabilität des Kniegelenks	250		Kraftübertragung	276
	Veränderung des Insertionswinkels	251		Kontaktflächenvergrößerung	276
	Veränderung der Bandlänge	251		Druckverminderung	277
1.1.7	Muskuläre Synergismen und Antagonismen der Kreuzbänder	253		Kraftverteilung	277
1.2	Die Kollateralbänder	257		Stoßdämpfung	277
1.2.1	Kinematik der Kollateralbänder	257		Übrige diskutierte Funktionen	278
1.2.2	Muskuläre Synergismen der Seitenbänder	259	1.4.4	Beanspruchung	278
1.3	Kinematik im dreidimensionalen Raum	259	1.4.5	Deformation und Bewegungen	278
1.3.1	Die Schlussrotation	259		Statisches Verhalten	278
1.3.2	Dreidimensionale Analyse der assoziierten Bewegungen während Flexion/Extension	260		Dynamisches Verhalten bei Flexions-/ Extensionsbewegung	278
	Bestimmung der Achse und ihrer Veränderung	260		Dynamisches Verhalten bei Rotationsbewegungen	279
	Klinische Relevanz der 3-D-Kinematik des Kniegelenks	264	1.5	Das Gleichgewicht in der Frontalebene	281
	Assoziierte Bewegungen bei aktiver und passiver Durchführung	266	1.5.1	Physiologische Beanspruchung	281
			1.5.2	Quantifizierung des valgusierenden Momentes	283
				Idealer Auflagepunkt der resultierenden Kraft	283
				Bestimmung der valgusierenden Kraft	284
			1.5.3	Varus- und Valguspathologie	284
				Stadium der varisierenden Präarthrose	284
				Stadium der varisierenden Arthrose	286
				Valguspathologie	286

2	Das femoropatellare Gelenk . . .	288
2.1	Bewegungen der Patella	288
	Definition der Bewegungen	288
	Bewegungen in der Sagittalebene	289
	Bewegungen in der Transversalebene	293
	Bewegungen in der Frontalebene	294
2.2	Auf das Gelenk wirkende Kräfte	295
2.2.1	Der Druck im Femoropatellargelenk	295
2.2.2	Bestimmung der femoropatellaren Kraft	296
2.2.3	Der Einfluss der Knieflexion	299
2.2.4	Einfluss des Gewichtsmomentes	299
2.2.5	Einfluss anderer Flexionsmomente	300
2.2.6	Einfluss der passiven Quadrizepskraft	301
2.3	Funktionen der Patella	302

2.3.1	Einfluss auf den Hebelarm des Extensormechanismus	302
	Theoretisches Modell	302
	Experimentelle Bestimmung des Hebelarmes	303
2.3.2	Einfluss auf die Beanspruchung der Patellarsehne	307
2.3.3	Zusammenfassung	310
2.4	Die Stabilität der Patella in der Frontalebene	311
2.4.1	Der Q-Winkel	311
2.4.2	Stabilisierende Faktoren für die Patella	312
	Knöcherne Faktoren	312
	Kapsulo-ligamentäre Faktoren	313
	Muskuläre Faktoren	313
	Dynamische Faktoren	314

Kapitel V – Der Fuß

1	Einleitung	317
2	Nomenklatur der Bewegungen des Tarsus. . .	317
3	Das obere Sprunggelenk . .	319
3.1	Allgemeines	319
	Erkenntnistheoretische Vorbemerkung	319
3.2	Gelenkflächen	320
3.3	Beanspruchungen	321
3.3.1	Funktionen der Malleolengabel	321
3.3.2	Experimentelle Untersuchung der Kraftübertragung	322
3.3.3	Experimentelle Bestimmung der Kontaktflächen	325
3.4	Kinematik der Malleolengabel	328
3.4.1	Klassische Theorie nach Pol LeCœur	328
3.4.2	Experimentelle Studien	329
3.5	Kinematik des oberen Sprunggelenks	331
3.5.1	Modell nach Inman (1976)	332
3.5.2	Synthese der Fibulabewegungen	339
3.5.3	Synthese der Bewegungskomponenten im oberen Sprunggelenk	341
	Referenzsystem im Unterschenkel	342
	Referenzsystem im Fuß	342

3.5.4	Das obere Sprunggelenk als Teil der Bewegungskette der unteren Extremität	344
	Erste Variante – Gleiche assoziierte Rotation im OSG und im Kniegelenk	346
	Zweite Variante – Mehr assoziierte Rotation im OSG als im Kniegelenk	347
	Dritte Variante – Weniger assoziierte Rotation im OSG als im Kniegelenk	348
3.6	Klinische Betrachtungen	349
3.6.1	Supinationstrauma und Osteochondritis dissecans	349
3.6.2	Kinematik bei Dysfunktionen des oberen Sprunggelenks	351
4	Das untere Sprunggelenk . .	352
4.1	Allgemeines	352
4.2	Gelenkflächen und Bänder	354
4.2.1	Gelenkflächen	354
4.2.2	Bänder	356
	Lateral und medial gelegene Bänder	356
	Plantare Bänder	358
	Interossär gelegene Bänder	359
4.3	Die Bewegungsachse im unteren Sprunggelenk	359
4.3.1	Bestimmung der Achse	359
4.3.2	Funktionelle Bedeutung der räumlichen Achsenlage und deren Veränderung	362

4.4	Analyse der Bewegungskomponenten im unteren Sprunggelenk	364	7	Fußmodelle	394
	Achsenorientierung	364		Das Schlusstein-Modell	394
	Kalkaneus zum Talus	364		Das Dreipunkt-Auflage-Modell	394
	Talus zum Kalkaneus	365		Die Lamina pedis	395
	Unterschenkel zum Kalkaneus	365		Der Talus-Kalkaneus-Fuß	396
	Synthese: Transferfunktion	365		Das Strahlen-Modell	397
4.5	Transferfunktion und Achsenorientierung	366		Das Dachstuhl-Modell	398
4.5.1	Einfluss des Neigungswinkels	368		Modell nach Hicks	400
4.5.2	Einflüsse auf die Transferfunktion	368		Unteres Sprunggelenk und Fußwölbung	400
	Inter- und intraindividuelle Unterschiede des Neigungswinkels	369	8	Hohl- und Plattfuß	403
	Veränderung des Neigungswinkels während der Bewegung	369		Radiologische Verfahren	403
	Einfluss des bewegungseinleitenden Segmentes	370		Fußabdruck-Analysen	404
	Veränderung der Transferfunktion durch das obere Sprunggelenk	370		Diskussion	406
4.5.3	Der Motor der Transferfunktion	372	9	Stoßdämpfersysteme	407
	Ergänzende Anmerkungen	376	9.1	Allgemeine klinische Überlegungen	407
4.5.4	Die Beanspruchung der Ligamente in der Transferfunktion	376	9.2	Physikalische Grundlagen der Stoßdämpfung	408
4.6	Die Form der hinteren Gelenkfläche	378	9.3	Überblick über mögliche Stoßdämpfersysteme des menschlichen Körpers	408
4.7	Helikoidale Translationen	380	9.4	Stoßdämpfersysteme des Fußes	410
4.7.1	Modell nach Manter	380		Fersenballen	410
4.7.2	Modell nach Benink	382		Spongioser Aufbau der Knochen des Rückfußes	410
4.7.3	Klinische Relevanz der beiden Modelle	386		Dezentrierte tibio-talo-kalkaneare Anordnung in der Frontalebene	411
5	Die Gelenklinien des Mittelfußes	387		Längswölbung des Fußes	411
5.1	Die Chopart-Gelenklinie	387		Quergewölbe des Fußes	412
5.2	Die Lisfranc-Gelenklinie	388		Drehstabfederung nach Hendrix	412
6	Muskelaktionen am Fuß	390		Doppeltes Drehpunktsystem des Fußes	412
			9.5	Stoßdämpfersysteme des übrigen Körpers	414
				Literatur	419
				Sach-Index	431
				Personen-Index	441