

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			
	Externe Kräfte	7			
3	Grundbegriffe der Kinematik der Gelenke	7	3.5	Assoziierte Bewegungen	30
3.1	Rotation und Translation	7	3.5.1	Praktisches Beispiel – Qualitative Analyse	31
	Translation	8	3.5.2	Quantitative Analyse	34
	Rotation	8		Idealfall	34
3.2	Rotation im zweidimensionalen Raum	9		Komponentenverteilung	34
3.2.1	Das Rotationszentrum	10		Formale Beschreibung der Komponentenverteilung	35
	Terminologie	10		Anwendungsbeispiel am femorotibialen Gelenk	35
	Definition	10			
	Bestimmung des Rotationszentrums	11			
	Translation – Ein Sonderfall der Rotation	13			
3.2.2	Diskretes Rotationszentrum versus momentanes Rotationszentrum	14	4	Beschreibungsmöglichkeiten einer dreidimensionalen Bewegung	36
3.2.3	Anhäufung von Rotationszentren	18	4.1	Gebräuchliche klinische Beschreibungsmethode	36
3.2.4	Sequenzen von Rotationen bzw. Rotationen und Translationen	18	4.2	Mathematische Bestimmung der Grundebenen	36
	Fall 1 – Sequentielle Rotationen mit gleichem Rotationszentrum	18	4.3	Gelenk-Koordinaten-System	38
	Fall 2 – Sequentielle Rotationen mit verschiedenem Rotationszentren	18	4.4	Kardan-Winkel	42
	Fall 3 – Sequentielle Rotationen mit verschiedenen Rotationszentren, gleicher Amplitude und gegenläufigem Drehsinn	20	4.5	Euler-Winkel	42
	Fall 4 – Zerlegung einer Translation	20	4.6	Twist-Tilt-Methode	44
	Fall 5 – Rotation mit Translation	20	4.7	Helikoidale Achse	44
	Fall 6 – Zerlegung einer Rotation	21	4.8	Andere Methoden	46
3.3	Freiheitsgrade	22		Augenbewegungen	46
	Kinematisch	22		Quaternions	46
	Mechanisch	22	4.9	Schlussbemerkung	46
	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		Bewegungssamplitude	75
	Dreidimensionale gekrümmte Flächen	51		Zurückgelegte Distanz, Radienlänge und Radienwinkel	76
7	Arthrokinematische Beschreibungen von Bewegungen	52	10	Virtuelle Deformation	77
7.1	Rollen und Gleiten	52			
7.1.1	Rollen	53	Grundlagen der Dynamik und Statik	78	
	Allgemeine Bestimmung des Rollens	53	Definition	78	
	Lage des Rotationszentrums beim Rollen .	54	Newton-Axiome	78	
7.1.2	Gleiten	56	Kraft und Gewichtskraft	79	
7.1.3	Rollgleiten	56	Darstellung von Kräften	79	
	Bestimmung eines Roll-Gleit-Index über Gelenkflächenkrümmung und Rotationszentrum	56	Addition zweier nicht-paralleler Kräfte mit gleichem Angriffspunkt	80	
	Analyse des Roll-Gleit-Index über Kontaktpunkte	58	Addition zweier nicht-paralleler Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten	81	
7.2	Sonderfall der Translation	60	Addition zweier paralleler Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten	81	
7.3	Beanspruchung der Knorpelflächen beim Gleiten und bei Translation	61	Addition von mehr als zwei Kräften	82	
7.4	Synthese: Der Bewegungsindex	62	Das Drehmoment	83	
7.5	Koaptation und Dekoaptation	65	Das Trägheitsmoment	85	
7.5.1	Winkel Gamma	65	Gleichgewichtsbedingungen	86	
	Fall 1 – Gamma ist kleiner oder gleich 20°	65			
	Fall 2 – Gamma ist größer als 20°	66			
7.5.2	Geschwindigkeitsvektor	66			
8	Versuch einer kinematischen Erklärung der Dysfunktion eines Gelenks	68			
	Amplitude	68	11	Materialeigenschaften von biologischen Geweben	87
	Rotationszentrum	68	11.1	Spannung und Dehnung	87
	Der Geschwindigkeitsvektor	69		Definition	87
	Der Bewegungs-Index	70		Spannung	87
	Helikoidale Achse	70		Dehnung	88
	Schlussbemerkung	70		Anmerkung	88
				Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Hooke-Gesetz – Elastizitätsmodul	89
				Formen der Spannung	90
				Reaktionstypen auf Deformation	91
			11.2	Das Verhalten biologischer Materialien	91
			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	Einschränkende Bedingungen	112
	Kollagen	95	12.1 Gelenkspiel.	112
	Grundsubstanz	98	Biomechanische Definition	113
	Andere Moleküle	99	12.2 Versuch einer funktionellen Klassifikation von Bändern	114
11.2.3	Viskoelastisches Verhalten von Geweben	99	12.2.1 Gelenke, bei denen die Ebene der Ligamente mit der Bewegungsebene zusammenfällt	114
	Kriechverhalten	101	Gekrümmte Gelenkflächen.	114
	Relaxations-Phänomen	102	Flache Gelenkflächen (planes Gelenk)	117
	Das Hysteresis-Phänomen	102	Theoretisches Modell nach Huson.	118
11.3	Das viskoelastische Verhalten beeinflussende Faktoren unter besonderer Berücksichtigung des Bindegewebes.	104	Praktische Anwendung des Modells.	123
	Gewebeaufbau	104	12.2.2 Gelenke, bei denen die Ebene der Ligamente rechtwinklig zur Bewegungsebene steht.	124
	Die Kraft selbst	104	12.2.3 Gelenke mit Kreuzbändern.	126
	Die Zeit.	104	Paralleles Pleuelstangensystem mit gleicher Stangenlänge	126
	Anspannungsgeschwindigkeit	104	Pleuelstangensystem mit ungleicher Stangenlänge	128
	Vorgeschichte	106	Gekreuztes Pleuelstangensystem	128
	Immobilisation.	106	12.2.4 Gelenke mit Bändern, die einen Drehpunkt darstellen	129
	Training und Mobilisation.	107	12.2.5 Gelenke mit Bändern, die eine Gelenkfläche bilden	130
	Art der myotensiven Technik.	108	12.2.6 Bänder, die kein Gelenk überbrücken	130
	Alter	108	12.3 Das Nockenwellen-Phänomen.	131
	Temperatur	109	12.4 Die exzentrische Bandinsertion.	133
	Hormonelle Faktoren	109	12.5 Die verriegelte Position	138
	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
1.2	Die Bewegungen des Beckenringes im Gesamten,	140		Anterior	146
	In der Sagittalebene	141		Posterior.	147
	In der Frontalebene.	141	2.3.2	Extrinsische Ligamente	148
	In der Transversalebene	142		Das Lig. sacrotuberale	148
2	Das Iliosakralgelenk.	142		Das Lig. sacrospinale.	150
2.1	Knorpelbeschaffenheit und Knorpeldicke	143	2.4	Terminologie der Bewegungen im Iliosakralgelenk.	150
2.2	Morphologie der Gelenkflächen	144		Nutation	150
				Kontranutation	152
			2.5	Bewegungsstudien zum Iliosakralgelenk.	153

2.5.1	Alte Theorien	153	4	Das Sakrokokzygeal- gelenk	174
2.5.2	Klassische Theorien	153		Gelenkflächen	174
2.5.3	Neuere Studien	154	4.1	Ligamente	174
2.5.4	Synthese	166	4.2	Bewegungen	175
3	Das Pubisgelenk	169	4.3	In der Sagittalebene	175
3.1	Gelenkflächen	169		In der Frontalebene	176
3.2	Ligamente	169	5	Die Lenden-Becken- Schere	177
3.3	Bewegungen	171	5.1	In der Sagittalebene	177
3.4	Beanspruchung	173	5.2	In der Frontalebene	180
	Modell nach Kapandji	173	5.3	In der Transversalebene	180
	Modell nach Pauwels	173	5.4	Epilog	181
	Muskuläre Stabilisationsfaktoren	174			

Kapitel III – Das Hüftgelenk

1	Anatomische Grundlagen	183	5	Auf das Hüftgelenk wirkende Kräfte	202
1.1	Entwicklung des Os coxae sowie des Acetabulums	183	5.1	Gleichgewichtsmodell für die Frontalebene im Einbeinstand	202
1.2	Die Form des Acetabulums und der Facies lunata	184	5.2	Experimentelle Daten	204
1.3	Das Labrum acetabulare	185	5.3	Kapsulo-ligamentäre Kräfte	209
1.4	Die Form des Femurkopfes	186	5.4	Muskuläre Funktionsanalyse	212
1.5	Die Bänder des Hüftgelenks	187	5.4.1	Drehmomentanalyse	212
2	Coxometrie	189	5.4.2	Komponentenzerlegung	213
2.1	In der Frontalebene	189	5.4.3	Muskelmodelle	216
2.2	In der Sagittalebene	192		Geraden-Modell	216
2.3	In der Transversalebene	193		Das Flächenmittelpunkt-Modell	216
2.3.1	Anteversionswinkel des Femurs	193	5.5	Verhalten der Koaptationskomponente der Hüftadduktoren während der Bewegung	220
2.3.2	Anteversionswinkel des Acetabulums	194	5.6	Verhalten der Koaptationskomponente der Hütabduktoren während der Bewegung	222
3	Femurüberdeckung und mögliche klinische Konsequenzen	195	5.7	Verhalten der Koaptationskomponente des M. iliopsoas während der Bewegung	223
3.1	Expulsive Coxarthrose	196	5.8	Zusammenfassung	224
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			

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		Klinische Relevanz der 3-D-Kinematik des Kniegelenks	264		Dynamisches Verhalten bei Rotationsbewegungen	279		Assoziierte Bewegungen bei aktiver und passiver Durchführung	266	1.5	Das Gleichgewicht in der Frontalebene	281	1.5.1	Physiologische Beanspruchung	281	1.5.2	Quantifizierung des valgisierenden Momentes	283		Idealer Auflagepunkt der resultierenden Kraft	283		Bestimmung der valgisierenden Kraft	284	1.5.3	Varus- und Valguspathologie	284		Stadium der varisierenden Präarthrose	284		Stadium der varisierenden Arthrose	286		Valguspathologie	286
	Klinische Relevanz der 3-D-Kinematik des Kniegelenks	264		Dynamisches Verhalten bei Rotationsbewegungen	279																																	
	Assoziierte Bewegungen bei aktiver und passiver Durchführung	266	1.5	Das Gleichgewicht in der Frontalebene	281	1.5.1	Physiologische Beanspruchung	281	1.5.2	Quantifizierung des valgisierenden Momentes	283		Idealer Auflagepunkt der resultierenden Kraft	283		Bestimmung der valgisierenden Kraft	284	1.5.3	Varus- und Valguspathologie	284		Stadium der varisierenden Präarthrose	284		Stadium der varisierenden Arthrose	286		Valguspathologie	286									
1.5	Das Gleichgewicht in der Frontalebene	281																																				
1.5.1	Physiologische Beanspruchung	281																																				
1.5.2	Quantifizierung des valgisierenden Momentes	283																																				
	Idealer Auflagepunkt der resultierenden Kraft	283																																				
	Bestimmung der valgisierenden 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	2.3.1	Einfluss auf den Hebelarm des Extensormechanismus	302
2.1	Bewegungen der Patella	288		Theoretisches Modell	302
	Definition der Bewegungen	288		Experimentelle Bestimmung des Hebelarmes	303
	Bewegungen in der Sagittalebene	289	2.3.2	Einfluss auf die Beanspruchung der Patellarsehne	307
	Bewegungen in der Transversalebene	293	2.3.3	Zusammenfassung	310
	Bewegungen in der Frontalebene	294	2.4	Die Stabilität der Patella in der Frontalebene	311
2.2	Auf das Gelenk wirkende Kräfte	295	2.4.1	Der Q-Winkel	311
2.2.1	Der Druck im Femoropatellargelenk	295	2.4.2	Stabilisierende Faktoren für die Patella	312
2.2.2	Bestimmung der femoropatellaren Kraft	296		Knöcherne Faktoren	312
2.2.3	Der Einfluss der Knieflexion	299		Kapsulo-ligamentäre Faktoren	313
2.2.4	Einfluss des Gewichtsmomentes	299		Muskuläre Faktoren	313
2.2.5	Einfluss anderer Flexionsmomente	300		Dynamische Faktoren	314
2.2.6	Einfluss der passiven Quadrizepskraft	301			
2.3	Funktionen der Patella	302			

Kapitel V – Der Fuß

1	Einleitung	317	3.5.4	Das obere Sprunggelenk als Teil der Bewegungskette der unteren Extremität	344
2	Nomenklatur der Bewegungen des Tarsus	317		Erste Variante – Gleiche assoziierte Rotation im OSG und im Kniegelenk	346
3	Das obere Sprunggelenk	319		Zweite Variante – Mehr assoziierte Rotation im OSG als im Kniegelenk	347
3.1	Allgemeines	319		Dritte Variante – Weniger assoziierte Rotation im OSG als im Kniegelenk	348
	Erkenntnistheoretische Vorbemerkung	319	3.6	Klinische Betrachtungen	349
3.2	Gelenkflächen	320	3.6.1	Supinationstrauma und Osteochondritis dissecans	349
3.3	Beanspruchungen	321	3.6.2	Kinematik bei Dysfunktionen des oberen Sprunggelenks	351
3.3.1	Funktionen der Malleolengabel	321	4	Das untere Sprunggelenk	352
3.3.2	Experimentelle Untersuchung der Kraftübertragung	322	4.1	Allgemeines	352
3.3.3	Experimentelle Bestimmung der Kontaktflächen	325	4.2	Gelenkflächen und Bänder	354
3.4	Kinematik der Malleolengabel	328	4.2.1	Gelenkflächen	354
3.4.1	Klassische Theorie nach Pol LeCœur	328	4.2.2	Bänder	356
3.4.2	Experimentelle Studien	329		Lateral und medial gelegene Bänder	356
3.5	Kinematik des oberen Sprunggelenks	331		Plantare Bänder	358
3.5.1	Modell nach Inman (1976)	332		Interossär gelegene Bänder	359
3.5.2	Synthese der Fibulabewegungen	339	4.3	Die Bewegungsachse im unteren Sprunggelenk	359
3.5.3	Synthese der Bewegungskomponenten im oberen Sprunggelenk	341	4.3.1	Bestimmung der Achse	359
	Referenzsystem im Unterschenkel	342	4.3.2	Funktionelle Bedeutung der räumlichen Achsenlage und deren Veränderung .	362
	Referenzsystem im Fuß	342			

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