

**Aus der Anatomischen Anstalt  
der Ludwig-Maximilians-Universität München  
Vorstand: Prof. Dr. med. Dr. h.c. R. Putz**

**Gelenkknorpelmorphologie des Ellbogen- und Kniegelenks  
von Säugetieren unter dem Aspekt der evolutionären  
Anpassung**

**Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München**

**vorgelegt von  
Astrid Grams  
aus München  
2007**

**Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität zu München**

**Berichterstatter:** Prof. Dr. med. F. Eckstein

**Mitberichterstatter:** Priv. Doz. Dr. S. Hinterwimmer  
Prof. Dr. K.J. Pfeifer

**Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter:** Dr. med. M. Hudelmaier

**Dekan:** Prof. Dr. med. D. Reinhardt

**Tag der mündlichen Prüfung:** 13.12.2007

***"Eine wirklich gute Idee erkennt man daran,  
dass ihre Verwirklichung von vorne herein ausgeschlossen erscheint."***

Albert Einstein (1879-1955)

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	1
<b>2. Literaturübersicht</b> .....	4
<b>2.1. Bipede und quadrupede Fortbewegung bei Säugetieren</b> .....	4
2.1.1. Quadrupede Nicht-Primaten.....	4
2.1.2. Primaten.....	5
2.1.3. Mensch.....	6
<b>2.2. Anatomie des Ellbogen- und des Kniegelenks von Säugetieren</b> .....	7
2.2.1. Ellbogengelenk.....	7
2.2.2. Kniegelenk.....	8
<b>2.3. Gelenkknorpel von Säugetieren</b> .....	10
2.3.1. Aufbau des Gelenkknorpels.....	10
2.3.2. Mechanik des Gelenkknorpels.....	10
2.3.3. Vergleichende Morphologie des Gelenkknorpels.....	12
2.3.2.1 Mikroskopischer Aufbau.....	12
2.3.2.2. Gelenkknorpeldicke.....	13
<b>3. Fragestellungen</b> .....	18
<b>4. Material und Methoden</b> .....	19
<b>4.1. Material</b> .....	19
4.1.1. Herrentiere / Primates.....	20
4.1.2. Fleischfresser / Carnivora.....	20
4.1.3. Huftiere / Ungulata.....	20
4.1.4. Hasenartige / Lagomorpha.....	20
4.1.5. Nagetiere / Rodentia.....	20
<b>4.2. Methoden</b> .....	23

---

4.2.1. Datenakquisition mit der Magnetresonanztomographie.....	23
4.2.2. Digitale Bildverarbeitung.....	24
4.2.3. Statistische Auswertung.....	26
<b>5. Ergebnisse.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1. Ellbogengelenk.....</b>	<b>27</b>
5.1.1. Humerus.....	32
5.1.2. Ulna.....	34
5.1.3. Radius.....	36
5.1.4. Prozentuale Verteilung der Gelenkfläche an den Einzelflächen.....	38
5.1.5. Mittlere Gelenkknorpeldicke an den Einzelflächen.....	39
<b>5.2. Kniegelenk.....</b>	<b>39</b>
5.2.1. Femur.....	44
5.2.2. Tibia.....	46
5.2.3. Patella.....	48
5.2.4. Prozentuale Verteilung der Gelenkfläche an den Einzelflächen.....	50
5.2.5. Mittlere Gelenkknorpeldicke an den Einzelflächen.....	51
<b>5.3. Vergleichende Ergebnisse von Ellbogen-, und Kniegelenk.....</b>	<b>51</b>
<b>6. Diskussion.....</b>	<b>54</b>
<b>6.1. Methodikdiskussion.....</b>	<b>55</b>
<b>6.2. Ergebnisdiskussion und Interpretation.....</b>	<b>58</b>
6.2.1. Gelenkknorpel und Körpergewicht.....	58
6.2.2. Gelenkknorpel und Lebenserwartung.....	60
6.2.3. Gelenkknorpel und Gangart.....	63
6.2.5. Einflussfaktoren auf prozentuale Verteilung und die mittleren Knorpeldicken an den Einzelflächen.....	65
6.2.6. Verhältnisse von Knorpel-Knochen-Grenze und Knorpeldicke	

---

an Ellbogen-, und Kniegelenk.....	64
<b>6.3. Schlussfolgerungen.....</b>	<b>68</b>
<b>7. Zusammenfassung.....</b>	<b>69</b>
<b>8. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>71</b>
<b>9. Bildanhang.....</b>	<b>82</b>
<b>10. Danksagung.....</b>	<b>86</b>
<b>11. Lebenslauf.....</b>	<b>87</b>

## 1. Einleitung:

Aufgrund der Vielfältigkeit und Einzigartigkeit der im Tierreich vorkommenden Arten und der unterschiedlichsten Umweltbedingungen liegt es nahe anzunehmen, dass sich der Körperbau der Tiere im Laufe der Phylogenese an die jeweiligen Lebensbedingungen adaptiert hat (Grizmeck 1967). Darwin beschrieb in seinen Evolutionstheorien, dass sich Spezies durch Mutation von Merkmalen an ihren Lebensraum anpassen (Darwin 1859). So finden sich bei Säugetieren verschiedenste Ausprägungen der Morphologie von Knochen, Muskulatur, Gelenken (Nickel et al. 1968; Salomon et al. 2003) und des Gelenkknorpels (Simon 1970; Stockwell 1971; Kaab et al. 1998).

Es ist jedoch bisher unklar, welche verschiedenen Faktoren die Morphologie des Gelenkknorpels, spezifisch die Knorpeldicke und die Gelenkflächengröße, von Knie-, und Ellbogengelenk beeinflussen. Körpergewicht, Gangart und Lebenserwartung einer Spezies stellen in diesem Zusammenhang mögliche Einflussgrößen dar.

Bisherige Untersuchungen am Gelenkknorpel von Säugetieren weisen darauf hin, dass bei sich vierbeinig fortbewegenden Säugetieren ein positiver Zusammenhang zwischen Körpergewicht und Körpergröße einerseits und der Dicke des Gelenkknorpels andererseits besteht (Simon 1970; Stockwell 1971; Kaab et al. 1998). In diesen Studien wurden allerdings nur jeweils eine kleine Auswahl an Spezies beurteilt (5 - 8 Arten), deren Körpergewicht und Körpergröße sich maximal um den Faktor 10 unterschieden. Darüber hinaus wurden die verschiedenen Lokomotionsmuster (quadruped, biped, fakultativ biped) nicht explizit berücksichtigt und die Dicke wurde nur an wenigen Messlokalisationen bestimmt, nicht jedoch über die gesamte Gelenkfläche.

Aus diesem Grund soll in der vorliegenden Studie eine größere Anzahl an Tieren untersucht werden, die eine große Spannweite von Körpergewicht und Körpergröße und unterschiedliche Fortbewegungsmuster aufweisen. Es soll dabei nicht nur, wie in den früheren Studien (Simon 1970; Stockwell 1971; Kaab et al. 1998), die Knorpeldicke

an wenigen Messorten untersucht werden, sondern auch die Größe der Gelenkfläche, die Dicke über die gesamte Fläche und das Knorpelvolumen beurteilt werden.

Es ist allgemein bekannt, dass es quadrupede (vierbeinig fortbewegend) Säugetiere gibt, die in der Lage sind, sich über unterschiedlich lange Strecken biped (zweibeinig) fortzubewegen. Einige Beispiele hierzu sind Kaninchen, Primaten, Biber oder Bären (Grizmeck 1967). Es stellt sich die Frage, inwieweit sich die Gelenkknorpelmorphologie bei diesen Arten von der ausschließlich quadrupeder (z.B. Katze, Hund, Rind, Nashorn) bzw. ausschließlich bipeder (Mensch) Säugetiere unterscheidet. Daher ist es von Interesse zu untersuchen, wie sich dieser Zusammenhang bei den sich unterschiedlich fortbewegenden Spezies auf die Morphologie des Gelenkknorpels des Ellbogengelenks, im Vergleich zu der des Kniegelenks, auswirkt.

Die Methoden der bisherigen vergleichenden Untersuchungen des Gelenkknorpels verschiedener Spezies beschränkten sich auf die Elektronenmikroskopie (Woodward et al. 1969; Simon 1970; Gardner et al. 1970; Stockwell 1971; Clark 1991; Kaab et al. 1998), womit nur ausgewählte Ausschnitte des Knorpels betrachtet werden können. Daher konnten in diesen Studien keine zuverlässigen Aussagen über die Dicke in ganzen Gelenkflächen gemacht werden. Die Magnetresonanztomographie und die digitale Bildverarbeitungsmethode (Stammberger et al. 1999a; Eckstein et al. 2001a) hingegen bieten heute die Möglichkeit als nicht-invasive Methoden die Gelenkknorpelmorphologie des gesamten Gelenks präzise (Burgkart et al. 2001; Eckstein et al. 2001a) und valide (Eckstein et al. 1998b; Graichen et al. 2000; Hyhlik-Durr et al. 2000; Eckstein et al. 2001a; Eckstein et al. 2002) zu analysieren. Dadurch besteht die Möglichkeit die am Gelenk beteiligten Knorpelflächen dreidimensional zu rekonstruieren, dadurch können umfangreichere Aussagen über die Morphologie (Dicke, Fläche) des Gelenkknorpels gemacht werden.



---

Mit diesen Methoden ist es nun erstmals möglich die Gelenkknorpelmorphologie an einem größeren Kollektiv von Säugetierspezies zuverlässig quantitativ zu erfassen und möglicherweise existieren phylogenetische Mechanismen, mit deren Hilfe der Gelenkknorpel in der Lage ist unterschiedliche Belastungssituationen zu bewältigen. Die Kenntnis dieser Mechanismen könnte unter Umständen Möglichkeiten zur Prävention oder Behandlung von belastungsinduzierten Gelenkknorpelerkrankungen aufzeigen.

## **2. Literaturübersicht:**

### **2.1. Bipede und quadrupede Fortbewegung bei Säugetieren**

Der Bewegungsablauf von Säugetieren, sowohl bei der bipeden, als auch bei der quadrupeden Fortbewegung, kann in eine Standphase und eine Schwungphase unterteilt werden. In der Standphase hat das Bein Kontakt zum Boden, in der Schwungphase „schwingt“ es. Diese Art der Fortbewegung kann auch vereinfacht mit dem „umgekehrten Pendel Modell“ beschrieben werden, das heißt, dass Arme und Beine während dem Gehen gegenläufig „schwingen“. Das Bein wird während der Standphase nur wenig gebeugt und verhält sich daher relativ „steif“ (Schmitt 2003). Dies ermöglicht einen optimalen Austausch von Gravitationskräften und kinetischer Energie (Cavagna et al. 1976). Die Fortbewegungsarten von Säugetieren können geschwindigkeitsabhängig in Gehen (symmetrische Fortbewegung) und Rennen (asymmetrische Fortbewegung) unterschieden werden. Bei der Fortbewegung spielen nicht nur die Bewegungen der Extremitäten, sondern auch Seitwärtsbewegungen der Wirbelsäule eine Rolle. Diese Seitwärtsbewegungen sind für etwa die Hälfte der zur Fortbewegung nötigen Schubkraft zuständig (Fischer et al. 2002).

#### **2.1.1. Quadrupede Nicht-Primaten**

Untersuchungen an kleinen und mittelgroßen, quadrupeden Säugern zeigten, dass sich die Drehpunkte von Schulter- und Hüftgelenk etwa auf gleicher Höhe befinden (Fischer et al. 2002), vordere und hintere Extremität also die gleiche funktionelle Länge aufweisen. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass sich die Kinematik der Bewegungsabläufe an der vorderen Extremität bei Gehen und Rennen nicht unterscheiden. Im Gegensatz dazu ist die Bewegungs-Kinematik an der hinteren Extremität beim Gehen durch eine Rückwärtsbewegung des Femur dominiert, wohingegen beim Rennen die Seitwärtsbewegung der Wirbelsäule die Hauptrolle spielt

(Fischer et al. 2002). Dynamische Analysen an Ziegen legen nahe, dass die mechanischen Kräfte, die beim langsamen, quadrupeden Gang vor allem in Schulter-, und Hüftgelenk entstehen, und dass dabei in der vorderen Extremität größere Kräfte auftreten, als in der hinteren (Pandy et al. 1988b; Demes et al. 1991). Das Kniegelenk spielt eine wichtige Rolle für die Energieübertragung beim schnellen Rennen ; das Ellbogengelenk dient bei Gehen und Rennen der Energieabsorption und der Regulation von Bewegungen (Pandy et al. 1988b). Für den Sprungvorgang zeigte sich, dass alle Gelenke (Schulter-, Hüft-, Ellbogen- und Kniegelenk) gleichermaßen an den Kraftübertragungen beteiligt sind (Pandy et al. 1988b). Untersuchungen der Kräfte, die auf die Knochen unterschiedlichen Gelenke von Hund, Pferd, Büffel, Elefant (Rubin et al. 1984) bzw. Maus, Hörnchen, Hund und Pferd (Biewener 1983) wirken, weisen darauf hin, dass sie bei allen untersuchten Spezies in der selben Größenordnung bewegen und sich nicht etwa direkt proportional mit dem Körpergewicht einer Spezies verändern (Biewener 1983; Rubin et al. 1984).

### **2.1.2. Primaten**

Vergleichende Untersuchungen an vierbeinigen Primaten und vierbeinigen Nicht-Primaten, die mit Hilfe von Kraftmessplattformen und Videosequenzen durchgeführt wurden, zeigten, dass bei den sich vierbeinig fortbewegenden Spezies, die nicht zu den Primaten gerechnet werden, die vordere Extremität größeren vertikalen Kräften ausgesetzt ist, als die hintere Extremität. Bei den sich vierbeinig fortbewegenden Primaten hingegen sind die Hinterbeine, sowohl beim Gehen, als auch beim Rennen, größeren Kräften ausgesetzt, als die Vorderbeine (Demes et al. 1991). Daher kann angenommen werden, dass die Fortbewegung bei Primaten von den Hinterbeinen dominiert wird (Demes et al. 1991; Schmitt 2003; Hanna et al. 2006). Außerdem wurde beschrieben, dass vordere und hintere Extremität beim Rennen größere vertikale Kräfte

erfahren, als beim Gehen (Hanna et al. 2006). Diese morphologischen und funktionellen Unterschiede sind möglicherweise durch die arborale (auf Bäumen) Fortbewegung vieler Primatenspezies bedingt, die eine funktionelle Differenzierung von vorderer und hinterer Extremität nach sich zieht (Schmitt 2003). Cineradiographische Messungen an Lemuren (kleine, quadrupede Primaten) und Vergleichen zu kleinen, quadrupeden Nicht-Primaten (Pica, Spitzhörnchen, Ratte) untersuchten die Verteilung der Antriebskraft an den einzelnen Gelenken der vorderen Extremität. Bei allen genannten Spezies scheint hauptsächlich eine Rotation der Skapula für die Antriebskraft der Vorderextremität verantwortlich zu sein. Innerhalb der Primaten wird diese Skapula-Bewegung mit zunehmender Körpergröße von einer Bewegung des Humerus im Schultergelenk abgelöst. Auch beim Menschen findet die Abduktion des Humerus eher im Schultergelenk statt (Schmidt et al. 2000). Verglichen mit gleich großen, quadrupeden Säugern sind bei Primaten größere Schrittlängen zu beobachten, was auf die relativ längeren Extremitäten, vor allem der vorderen Extremitäten, und die größeren Flexionsbewegungen bei Primaten während der Schwungphase zurückgeführt wurde (Reynolds 1987; Schmitt 2003). Bei der bipeden Fortbewegung fakultativ bipeder Primaten ist die Bewegung der Extremitäten wesentlich geringer ausgeprägt, als bei der quadrupeden (Reynolds 1987).

### **2.1.3. Mensch**

Im Rahmen der Entwicklung von bipeden Robotern wurden Untersuchungen des bipeden Ganges beim Menschen durchgeführt, die darauf hinweisen, dass die morphologischen und funktionellen Eigenheiten eine optimale Anpassung an diese Art von Bewegung darstellen. Das Zusammenspiel von gegenläufigen Pendelbewegungen der Arme und Beine, optimale Längen von oberen und unteren Extremitäten und Torsionsbewegungen von Sprung-, und Wirbelgelenken charakterisieren die

menschliche Fortbewegung (Witte et al. 2004). Im Vergleich zu anderen Spezies führen beim bipeden Gang des Menschen die Extremitäten nur geringe Flexionsbewegungen aus und beim Rennen weist der Mensch längere „Flugphasen“ auf (Reynolds 1987). Diese spezialisierten Bewegungsabläufe beim Menschen ermöglichen einen an die Körperform angepassten, geringen Energieverbrauch (Kimura 1996). Studien über die Evolution des menschlichen, bipeden Ganges folgerten, dass dieser sich aus arboralen Hominoiden und nicht aus auf dem Land fortbewegenden Spezies entwickelt hat. Eine bedeutende morphologische Veränderung zwischen frühen Hominoiden und dem modernen Menschen fand über eine Verlängerung der Hinterbeine und robustere Gelenke an Hinterbeinen und Wirbelsäule statt (Schmitt 2003).

## **2.2. Anatomie des Ellbogen- und Kniegelenks von Säugetieren**

Sowohl das Knie- als auch das Ellbogengelenk sind, trotz teilweise unterschiedlicher Bewegungsmuster, bei den verschiedenen Spezies ähnlich aufgebaut (Nickel et al. 1968). Ausnahmen davon stellen Säugetiere dar, die sich phylogenetisch anders entwickelt haben als die Mehrzahl der Säugetiere. Beispiele hierfür sind Meeressäugetiere (z.B. Wal) oder Flugsäugetiere (z.B. Fledermaus). Für diese Studie wurden daher nur „Landsäugetiere“ ausgewählt, die sich phylogenetisch unter ähnlichen Bedingungen wie der Mensch entwickelt haben.

### **2.2.1. Ellbogengelenk**

Das Ellbogengelenk (Articulatio cubiti) weist beim Menschen und den übrigen untersuchten Säugetiere einen vergleichbaren Aufbau auf (Nickel et al. 1968; Benninghoff et al. 2003). Bei allen untersuchten Spezies werden die knöchernen Gelenkkörper des Ellbogengelenks von Humerus, Ulna und Radius gebildet. Man unterscheidet am Ellbogen drei Teilgelenke (Nickel et al. 1968; Benninghoff et al. 2003;

Salomon et al. 2003), die *Articulatio humeroulnaris* zwischen der *Trochlea humeri* und der *Incisura trochlearis* der *Ulna*, die *Articulatio humeroradialis* zwischen dem *Capitulum humeri* und dem *Caput radii*, sowie die *Articulatio radioulnaris proximalis* zwischen dem *Caput radii* und der *Incisura radialis* der *Ulna*. Das Ellbogengelenk ist bei allen genannten Spezies von einer bindegewebigen Gelenkkapsel umgeben und wird durch 3 Bänder verstärkt, dem *Ligamentum collaterale ulnare*, dem *Ligamentum collaterale radiale* und dem *Ligamentum anulare radii* (Nickel et al. 1968; Benninghoff et al. 2003; Salomon et al. 2003).

Trotz des sehr ähnlichen Bauplanes der untersuchten Säugetiere existieren kleinere Unterschiede. Bei einigen Fleischfressern (z.B. Katze, Hund) und beim Menschen artikuliert der Humerus mit beiden Unterarmknochen (Nickel et al. 1968; Denny 1987; Benninghoff et al. 2003; Salomon et al. 2003), bei den Huftieren (z.B. Pferd, Rind, Schwein) artikuliert nur der Radius mit dem Humerus und die *Ulna* liegt lediglich seitlich an (Wissdorf 1965; Nickel et al. 1968; Nixon 1990; Salomon et al. 2003). Der *Musculus pronator teres*, der bei Katze, Hund und dem Menschen ausgebildet ist, ist bei Pferd und Rind nur rudimentär vorhanden (Nickel et al. 1968; Nixon 1990; Salomon et al. 2003).

### **2.2.2. Kniegelenk**

Der makroskopische Aufbau des Kniegelenks (*Articulatio genus*) ist, wie beim Ellbogengelenk, bei den meisten Säugetieren sehr ähnlich (Nickel et al. 1968; Benninghoff et al. 2003; Salomon et al. 2003). Am Kniegelenk werden die knöchernen Gelenkkörper von *Femur*, *Tibia* und *Patella* gebildet. Das Kniegelenk wird in 3 Teilgelenke unterteilt (Nickel et al. 1968; Benninghoff et al. 2003; Salomon et al. 2003), die *Articulatio femorotibialis medialis* zwischen *Condylus medialis* des *Femur* und *Condylus medialis* der *Tibia*, die *Articulatio femorotibialis lateralis* zwischen den beiden

lateralen Condylen und die *Articulatio femoropatellaris* zwischen Femur und der Patella. Als Besonderheit gibt es am Kniegelenk an den beiden *Articulationes femoro-tibiales* je einen Meniskus aus Faserknorpel, die an der Druckübertragung (Benninghoff et al. 2003) im Kniegelenk beteiligt sind. Wie auch beim Ellbogengelenk sind am Knie eine Gelenkkapsel und mehrere Bänder vorhanden. Zwischen Femur und Tibia bzw. Fibula befinden sich die *Ligamenti collaterale tibiale* bzw. *collaterale fibulare* und die *Ligamenti cruciati anterior* und *posterior* (Nickel et al. 1968; Frank et al. 1999; Benninghoff et al. 2003; Salomon et al. 2003).

Am Kniegelenk verschiedener Landsäugetierarten sind einige anatomische Unterschiede zu beobachten. Bei Hund, Rind und beim Menschen existiert ein *Ligamentum intermeniscale* / *Ligamentum transversum genus*, das den medialen und lateralen Meniskus miteinander verbindet (Nickel et al. 1968; Benninghoff et al. 2003; Salomon et al. 2003). Beim Känguru stellt die Fibula einen Teil des Kniegelenks dar (Lodder 1991), wohingegen sie bei den meisten Säugetieren nicht an der Bildung des Kniegelenks beteiligt ist und bei Rind und Pferd nur als rudimentäres Knochenstück vorhanden und fest mit der lateralen Tibia verwachsen ist (Nickel et al. 1968; Salomon et al. 2003). Auch zwischen den Primaten gibt es kleinere Unterschiede in der Anatomie des Kniegelenks (Preuschoft 1960; Zivanovic 1972). Primatenarten, die sich vor allem springend fortbewegen sind (z.B. Lemuren) besitzen am Kniegelenk nicht nur die Patella, sondern auch eine knorpelige Struktur, die an der Vorderseite der Tibia, unterhalb der Patella dem *M. vastus medialis* (Strecker im Kniegelenk) als Ansatzpunkt dient und zusätzlich als Sesambein an der Streckseite der unteren Extremität fungiert. Primaten, die auf das Klettern spezialisiert sind (z.B. *Cebidae*) besitzen zusätzlich zur Patella zwei Sesambeine an den Ursprüngen des *M. gastrocnemius* (Kniegelenksbeuger) beidseits an der Rückseite des Femurs. Bei einigen Primaten (z.B. Gorilla) sind einzelne Bandstrukturen am Kniegelenk wie das *menisco-fibulare Ligament*

wesentlich stärker ausgebildet als beim Menschen, während das menisco-femorale Ligament bei Mensch und Gorilla gleich stark ausgeprägt ist (Zivanovic 1972). Zusätzlich gibt es Besonderheiten, die unter den Primaten nur der Mensch aufweist, wie den Tractus iliotibialis (Preuschoft 1960; Benninghoff et al. 2003).

### **2.3. Gelenkknorpel von Säugetieren**

#### **2.3.1. Aufbau und Mechanik des Gelenkknorpels**

Der Gelenkknorpel des Knie- und Ellbogengelenkes ist, wie bei allen synovialen Gelenken, bei den meisten Säugetieren aus hyalinem Knorpelgewebe aufgebaut. Eine Ausnahme stellt das Känguru dar, das im zentralen Abschnitt der Tibia ein Faserknorpelpolster aufweist, das von hyalinem Knorpel umgeben ist (Lodder 1991).

Das Knorpelgewebe ist, abhängig von der Spezies (Hunziker 2002), zu etwa 5-10% aus Zellen und zu etwa 90-95% einer Matrix aufgebaut (Benninghoff et al. 2003). Die Zellen (Chondroblasten und Chondrozyten) sezernieren Knorpelmatrix, Kollagene und Proteoglykane, welche große Mengen an interstitieller Flüssigkeit binden können. Die Kollagenfasern bilden ein Netzwerk aus Mikrofibrillen aus (Hunziker 2002). Einem osmotischen Druck, der von den Proteoglykanen ausgeht, wirkt die von den Kollagenfasern ausgeübte Zugspannung entgegen. (Maroudas A. 1980; Maroudas A. et al. 1986; Mow et al. 1992; Maroudas A. et al. 1992; Mow et al. 1997).

Gelenkknorpel kann histologisch in vier Zonen eingeteilt werden (Benninghoff et al. 2003). In der oberflächlichen, gelenknahen Tangentialfaserzone sind die Kollagenfasern und Knorpelzellen parallel zur Gelenkoberfläche angeordnet (Lane et al. 1975; Mankin et al. 1975; Glaser et al. 2002; Hunziker 2002). Daran schließt sich eine Übergangszone an, in der Kollagenfasern keine Vorzugsrichtung aufweisen und die Knorpelzellen uneinheitlich angeordnet sind. In der dritten Zone, der Radiärzone, verlaufen die Kollagenfasern radiär und die Knorpelzellen sind ebenfalls senkrecht zur



Oberfläche angeordnet. Zone vier stellt eine kalzifizierte, zellarme Schicht dar, die auch als „Tidemark“ bezeichnet wird und fest mit dem subchondralen Knochen verbunden ist.

Der hyaline Gelenkknorpel und die Synovialflüssigkeit ermöglichen bei dynamischer Aktivität ein reibungsarmes Gleiten der Gelenkflächen. Das ermöglicht einen hydrostatischen Druckaufbau im Knorpel (Ateshian et al. 1994) und eine gleichmäßige Kraftübertragung auf den subchondralen Knochen (Benninghoff et al. 2003). Auf die vergleichende Anatomie zwischen Säugetierspezies wird im Kapitel 2.3.2.1. eingegangen.

Bei einer Belastung des Knorpels entsteht zunächst ein hydrostatischer Druck (Mow et al. 1984), in dieser Phase findet keine Kompression der Matrix statt (Ateshian et al. 1995). Die geringe Permeabilität des Gelenkknorpels verhindert eine Umverteilung der Flüssigkeit in die Matrix und eine Exsudation der Flüssigkeit in den Gelenkspalt (Setton et al. 1993). Bei Persistieren des Druckes auf den Knorpel über einen längeren Zeitraum wird Flüssigkeit durch die Poren der Kollagen-Proteoglykan-Matrix gepresst. Wenn dieser Flüssigkeitsstrom erschöpft ist, wird die gesamte Last von der Matrix getragen. Den Zustand bei dem keine weitere Deformation des Knorpels stattfindet bezeichnet man als „Equilibrium-Modulus“. Diese Eigenschaften des Gelenkknorpels werden als poroelastisch oder biphasisch (Mow et al. 1980; Huang et al. 2003) bezeichnet und verhindern eine übermäßige Belastung der Matrixbestandteile (Ateshian et al. 1994; Ateshian et al. 1995; Wu et al. 1996; Soltz et al. 1998; Herberhold et al. 1999). Ultrastrukturelle Untersuchungen des Gewebes zeigen, eine Heterogenität Reaktion auf mechanische Belastung ; die Tangentialzone wird stärker komprimiert als die tieferen Schichten, da hier stärkere Zugkräfte wirken (Gore et al. 1983; Putz et al. 1993; Guilak et al. 1995; Guilak 1995; Schinagl et al. 1997; Glaser et al. 2002).

Untersuchungen verschiedener Säugetierspezies (Hase, Hund, Schimpanse, Rind und Mensch) zeigten, dass die biomechanischen Eigenschaften des femoralen

Gelenkknorpels bei den untersuchten Spezies grundsätzlich ähnlich seien, jedoch auch Spezies-spezifische Unterschiede existieren. So ist die Permeabilität des Knorpelgewebes bei allen untersuchten Spezies am größten an der patellaren Gelenkfläche, wobei der Schimpanse die größte und der Hund die geringste Permeabilität aufwies. Die Steifigkeit des Knorpels unterschied sich bei den Spezies nicht signifikant (Athanasίου et al. 1991).

### **2.3.2. Vergleichende Morphologie des Gelenkknorpels**

Es existiert eine Reihe von Studien, die den mikroskopischen Aufbau des Gelenkknorpels einzelner Säugetierspezies beschreiben oder die Knorpelmorphologie verschiedener Spezies miteinander vergleichen. Diese Studien dienten vor allem der Detektion von Veränderungen der Knorpelmorphologie im Rahmen von Immobilisations-, Remobilisations- oder Belastungsstudien an Tieren.

#### **2.3.2.1. Mikroskopischer Aufbau**

Durch elektronenmikroskopische Untersuchungen bei verschiedenen Gelenken von Schwein, Kaninchen, Ratte und Mensch konnte gezeigt werden, dass die Knorpeloberflächen bei allen untersuchten Spezies zottenartige Ausläufer und leichte Vertiefungen aufweisen (Woodward et al. 1969). Lichtmikroskopische Untersuchungen von fünf Säugetierspezies (Kaninchen, Meerschweinchen, Ratten, Maus und Mensch) zeigten ebenfalls ein unregelmäßiges, wellenförmiges Erscheinungsbild der Knorpeloberfläche am Kniegelenk (Gardner et al. 1970). Elektronenmikroskopische und lichtmikroskopische Vergleiche der Kollagenfaseranordnung an der Tibia und am Femur von Rind, Schwein, Schaf, Hund, Kaninchen, Ratte und Mensch zeigten, dass der Gelenkknorpel bei allen untersuchten Spezies in Zonen gegliedert ist (Clark 1991; Kaab et al. 1998). Bei Mensch, Schwein und Hund war eine blätterartige (horizontale)

Anordnung der Kollagenfasern im Bezug zur Gelenkfläche zu finden, bei den übrigen Spezies waren die Fasern eher säulenartig (vertikal) angeordnet. Beim Mensch waren, im Vergleich zu den anderen Spezies, die Kollagenfasern in dickeren Bündeln angeordnet; bei Kaninchen war im Vergleich zu Mensch und Hund eine lockerere Anordnung und geringere Dichte der Kollagenfasern zu finden. Außerdem wurden bei Kaninchen am zentralen Tibiaplateau tiefere Fissuren beschrieben als bei Mensch und Hund (Clark 1991). Der zentrale Teil der Gelenkfläche ohne Kontakt zum Meniskus wies an der Knorpeloberfläche rundliche Zellen auf und die Kollagenfasern waren bündelartig und inhomogen angeordnet. Jeffery stellte mit Hilfe elektronenmikroskopischer Untersuchungen fest, dass sich beim Gelenkknorpel des Metakarpalgelenkes bei Rindern die Kollagenfaseranordnung der oberen Schichten im Elektronenmikroskop vor allem blätterartig (horizontal) und weniger säulenartig (vertikal) in Bezug zur Gelenkfläche darstellt (Jeffery et al. 1991).

#### **2.3.2.2. Gelenkknorpeldicke**

Simon untersuchte mit verschiedenen Methoden die maximale Gelenkknorpeldicke des Ellbogen- und Kniegelenks von Rind, Schaf, Hund (fotografisch), Ratte und Maus (elektronenmikroskopisch) (Simon 1970) (Tab. 2.1.). Er fand die größten Werte für die tibialen Gelenkflächen des Femurs und das Tibiaplateau beim Rind (3,17 mm) und die kleinsten bei der Maus (0,030 mm). Für die Patella beschrieb er den dicksten Knorpel beim Rind (3,13 mm) und den dünnsten beim Kaninchen (0,024 mm). Am Ellbogengelenk fand er ebenfalls die größte maximale Knorpeldicke beim Rind (1,44 mm) und die kleinste bei der Maus (0,034 mm). Simon beschrieb die Regressionsgerade eines doppelt logarithmischen Diagramms im Sinne einer allometrischen Beziehung ( $y = b * x^k$ ) zwischen maximaler Knorpeldicke und Hüft-Schulter-Länge, beziehungsweise maximaler Knorpeldicke und Körpergewicht. Er fand

eine ausgeprägte positive Korrelation zwischen maximaler Knorpeldicke und Hüft-Schulter-Länge (Steigung der Regressionsgerade 1,27) und eine weniger ausgeprägte Korrelation zwischen maximaler Knorpeldicke und Körpergewicht. (Steigung der Regressionsgerade 0,45).

Spezies	Körpergewicht (kg)	Femur / Tibia (mm)	Patella (mm)	Humerus / Radius (mm)
Rind	300	3,17	3,13	1,44
Schaf	75	1,68	1,65	0,62
Hund	25-30	1,30	1,10	0,76
Ratte	0,331	1,165	0,060	0,095
Maus	0,025	0,030	0,024	0,034

**Tab. 2.1. Ergebnisse Arbeit Simon 1970:**

*Das Körpergewicht (kg) und die maximalen Knorpeldicken in (mm) von Kniegelenk (Femur / Tibia und Patella) und Ellbogengelenk (Humerus / Radius) verschiedener Säugetierspezies (Simon 1970).*

Kääb zeigte in einer Spezies vergleichenden Studie, die die maximale Gelenkknorpeldicke des Tibiaplateaus von Rind, Schwein, Schaf, Hund, Kaninchen, Ratte und Mensch untersucht ebenfalls beim Rind die größte maximale Knorpeldicke (4,4 mm) (Tab. 2.2.), wobei der Mensch in der tangentialen Zone die größte maximale Dicke aufwies (Kaab et al. 1998).

Spezies	Körpergewicht (kg)	Maximale Dicke Tibiaplateau (mm)
Rind	560	4,4
Mensch	90	3,6
Schwein	170	1,9
Hund	30	1,8
Schaf	60	1,4
Kaninchen	2	1,3
Ratte	-	0,3

**Tab. 2.2. Ergebnisse Arbeit Kääb 1998:**

*Das Körpergewicht (kg) und die maximalen Knorpeldicken (mm) des zentralen Tibiaplateaus von verschiedenen Säugetierspezies (Kaab et al. 1998). Bei den Angaben handelt es sich um Schätzwerte, da sie in der Originalarbeit nur aus einem Diagramm abzulesen waren.*

Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Femurkondylen (Stockwell 1971) von Rind, Schaf, Hund, Kaninchen, Katze, Ratte, Maus und Mensch zeigten beim Menschen die größte maximale Knorpeldicke (1,26 mm). Bei den übrigen Spezies wurde ein signifikant positiver Zusammenhang (Steigung der Regressionsgerade 0,4) zwischen maximaler Knorpeldicke und Körpergewicht gefunden (Tab. 2.2.).

Spezies	Körpergewicht (kg)	Maximale Dicke Femurkondylen (mm)
Rind	600	1,68
Mensch	72	1,26
Schaf	50	0,84
Hund	23,7	0,67
Kaninchen	3,2	0,214
Katze	2,3	0,327
Ratte	0,28	0,072
Maus	0,025	0,058

**Tab. 2.2. Ergebnisse Arbeit Stockwell 1971:**  
*Das Körpergewicht (kg) und die maximalen Knorpeldicken in (mm) der Femurkondylen von verschiedenen Säugetierspezies (Stockwell 1971).*

Mikroskopische Untersuchungen an Neuseeland-Kaninchen (Rasanen et al. 1996b; Hudelmaier et al. 2003) zeigten, dass bei dieser Spezies wie beim Menschen der tibiale Gelenkknorpel dicker ist, als der femorale (Tab. 2.3.). Sowohl bei der Tibia, als auch beim Femur war medial ein dickerer Knorpel zu finden (Hudelmaier et al. 2003), als lateral, was sich beim Menschen anders darstellt. Am medialen Femur wurden Werte zwischen 0,3 mm und 0,44 mm, am lateralen zwischen 0,19 mm und 0,28 mm beschrieben. Die mediale Tibia zeigte eine durchschnittliche Dicke von 0,9 mm, die laterale von 0,47 mm. Im Rahmen von Distractionsuntersuchungen wurden mikrospektrometrisch an japanischen Weißkaninchen die mittlere Gelenkknorpeldicke des medialen Femurkondylus gemessen (Hung et al. 1997). Bei den 23 untersuchten Tieren ergaben sich für die Dicke Werte zwischen 0,38 mm und 0,46 mm (Tab 2.3.). In einer Studie von Stockwell (Stockwell 1971) wurden für die mittlere Knorpeldicke der

Femurkondylen von Kaninchen Werte von durchschnittlich 0,2 mm beschrieben (Tab 2.3.).

Studie	Körpergewicht (kg)	Femur Dicke (mm)	Tibia Dicke (mm)
Stockwell (1971)	3,2	0,19 – 0,28 (l) 0,30 – 0,40 (m)	0,9 (m) 0,47 (l)
Räsänen (1996)	3,9 – 4,3	0,214 (g)	-
Hung (1997)	3,5	0,38 – 0,46 (m)	-

**Tab. 2.3. Ergebnisse verschiedener Studien:**

Das Körpergewicht (kg) und die mittleren Knorpeldicken (mm) an den Gelenkflächen des Kniegelenks von Kaninchen mehrerer Studien sind vergleichend dargestellt (Stockwell 1971; Rasanen et al. 1996a; Hung et al. 1997). Die Ergebnisse für die einzelnen Gelenkflächen (Femur, Tibia) sind zusätzlich durch die Lokalisation der Messungen (m = medial, l = lateral, g = gesamter Kondylus) beschrieben.

In verschiedenen Studien mit Beagle-Hunden wurde mit Hilfe von mikrospektrometrischen und lichtmikroskopischen Messungen die mittlere Knorpeldicke am Kniegelenk bestimmt (Kiviranta et al. 1987; Kiviranta et al. 1988; Arokoski et al. 1994; Kiviranta et al. 1994; Newton et al. 1997; Haapala et al. 1999; Haapala et al. 2000). Für den medialen Femurkondylus ergaben sich Dicken zwischen 0,50 und 1,06 mm, für den lateralen Femurkondylus zwischen 0,46 und 1,19 mm. An den Tibiakondylen zeigten sich im medialen Kompartiment Werte zwischen 1,09 und 1,20 mm und im lateralen 0,78 und 0,89 mm (Tab. 2.4.). Für die Gelenkflächengrößen unterschiedlicher Spezies gibt es, mit Ausnahme des Menschen, unseres Wissens nach keine Angaben in der Literatur.

Studie	Gewicht (kg)	Femur Dicke (mm)	Tibia Dicke (mm)	Patella Dicke (mm)
Kiviranta et al. (1987)	-	0,50 (m) 0,46 (l)	0,79 (g)	-
Kiviranta et al (1988)	-	0,97 (m) 0,93 (l)	0,95 (g)	0,99
Arokoski et al (1994)	12,3	0,92 (m) 0,58 (l)	1,09 (m) 0,89 (l)	- -
Kiviranta et al. (1994)	9,8	1,06 (m) 1,19 (l)	1,03 (g)	1,16
Newton et al. (1997)	-	-	0,90 (g)	-
Haapala et al. (1999)	-	0,48 (l)	0,78 (l)	-
Haapala et al. (2000)	-	0,96 (m)	1,2 (m)	0,68

**Tab. 2.4. Ergebnisse verschiedener Studien:**

Die mittleren Knorpeldicken an den Gelenkflächen des Kniegelenks von Beagle Hunden mehrerer Studien sind vergleichend dargestellt. Die Ergebnisse für die einzelnen Gelenkflächen (Femur, Tibia, Patella) sind zusätzlich durch die Lokalisation der Messungen (m = medial, l = lateral, g = gesamter Kondylus) beschrieben.

### 3. Fragestellungen:

Ziel der vorliegenden Studie war es die Gelenkknorpelmorphologie des Knie- und des Ellbogengelenks verschiedener Landsäugetierspezies unter dem Aspekt der evolutionären Anpassung zu vergleichen. Hierzu wurden mit Hilfe der Magnet-Resonanz-Tomographie und digitaler Bildbearbeitungsverfahren die Gelenkflächen des Knie-, und Ellbogengelenks verschiedener Spezies untersucht und die Werte für die Größe der Knorpel-Knochen-Grenzen, der Gelenkflächen, des Knorpelvolumens sowie der mittleren und maximalen Knorpeldicke bestimmt. Diese Daten wurden mit Ergebnissen aus früheren Studien am Menschen verglichen.

Hierbei stellten wir die konkreten Fragen:

- 1) Gibt es Zusammenhänge zwischen der Größe der Knorpel-Knochen-Grenze oder der Knorpeldicke des Ellbogen-, und Kniegelenks und den Parametern Körpergewicht, Lebenserwartung und Gangart einer Spezies?
- 2) Besteht ein Zusammenhang zwischen der prozentualen Verteilung Knorpel-Knochen-Grenzen oder der Verteilung von mittlerer Knorpeldicke an den Einzelflächen der Gelenke und den Parametern Körpergewicht und Gangart der untersuchten Spezies?
- 3) Wie verhalten sich Größe der Knorpel-Knochen-Grenze und Knorpeldicke zwischen Ellbogen-, und Kniegelenk einer Spezies?



## 4. Material und Methoden

### 4.1. Material

Untersucht wurden die Knie-, und Ellbogengelenke von insgesamt 14 verschiedenen Landsäugetierarten (Tab. 4.1). Um die Artenvielfalt der Säugetiere so vollständig wie möglich abzudecken wurde versucht, aus möglichst vielen Landsäugetierordnungen mindestens eine Spezies zu untersuchen. Jede untersuchte Spezies wurde durch ein oder mehrere Individuen vertreten (Abb. 4.1). Das Material stammte von ausgewachsenen Tieren, da mit der MRT bei offenen Epiphysenfugen der Gelenkknorpel nicht eindeutig von epiphysialem Knorpel abgegrenzt werden kann. Der Gelenkknorpel der untersuchten Tiere wies keine auffälligen Knorpelverletzungen oder degenerative Veränderungen auf. Die Vorder- und Hinterbeine der Tiere wurden so präpariert, dass die Knie- und Ellenbogengelenke mit intakter Gelenkkapsel und umgebenden Weichteilmantel entnommen werden konnten. Das Material wurde bei -17°C tiefgefroren gelagert und rechtzeitig zur Messung aufgetaut oder in 4 prozentiger Formalinlösung konserviert. Die Daten vom menschlichen Kniegelenk wurden als Mittelwerte aus einer 127 Individuen umfassenden Datenbank erhoben (Hudelmaier et al. 2001; Hudelmaier et al. 2003). Die Daten vom Ellbogen des Menschen stellten die Mittelwerte zweier Individuen dar, zusätzlich wurden die Daten aus einer Studie mit 10 Individuen eingeschlossen (Springer et al. 1998). Für letztere wurden die Werte für die Größe der KKG aus dem Verhältnis von Knorpelvolumen und mittlere Knorpeldicke berechnet, da in der genannten Studie die Größe der KKG nicht angegeben wurden. Die untersuchten Parameter umfassten Knorpel-Knochen-Grenze, Gelenkfläche, Knorpelvolumen, mittlere Knorpeldicke und maximale Knorpeldicke der einzelnen Knorpelplatten und der gesamten Gelenke.

#### **4.1.1. Herrentiere / Primates**

Aus der Ordnung der Primates (Herrentiere) wurden der Mensch (*Homo sapiens sapiens*), der Schimpanse (*Pan troglodytes*), der Mandrill (*Mandrillus sphinx*) und der Pavian (*Papio Cynocephalus*) untersucht (Abb. 9.6., 9.7., 9.9. und 9.11.).

#### **4.1.2. Fleischfresser / Carnivora**

Die Carnivora (Fleischfresser) wurden durch die Hauskatze (*Felis catus*), die Wildkatze (*Felis silvestris*), verschiedene Haushundrassen (*Canis familiaris*) und den Schwarzbären (*Ursus americanus*) repräsentiert (Abb. 9.4., 9.8., 9.12., 9.13.).

#### **4.1.3. Huftiere / Ungulata**

Von den Ungulata (Huftiere) und der Unterordnung Perissodactyla (Unpaarhufer) wurden das Hauspferd (*Equus caballus przewalskii*) und das Breitmaulnashorn (*Ceratotherium simum*) ; aus der Unterordnung der Aritodactyla (Paarhufer) das Hausschwein (*Sus scrofa domesticus*) und das Hausrind (*Bos prigeminus domesticus*) untersucht (Abb. 9.1., 9.2., 9.3. und 9.5.).

#### **4.1.4. Hasenartige / Lagomorpha**

Von den Lagomorpha (Hasenartige) wurde durch das Hauskaninchen (*Orytolagus cuniculus*) untersucht (Abb. 9.14.).

#### **4.1.5. Nagetiere / Rodentia**

Die Rodentia (Nagetiere) wurden durch den Biber (*Castor fiber*) repräsentiert (Abb. 9.10.).

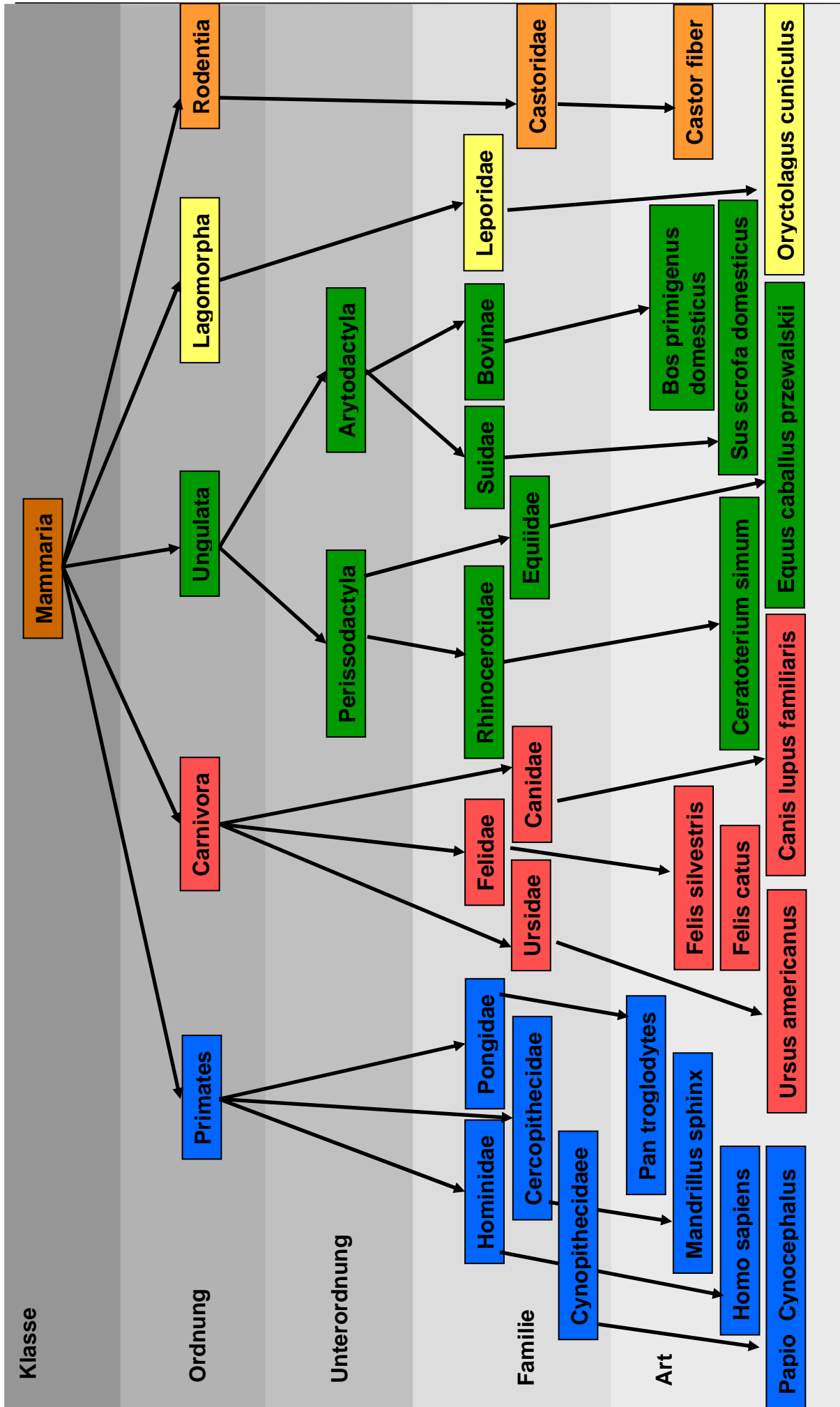


Abb. 4.1. Klassen, Ordnungen, Unterordnungen, Familien und Arten der untersuchten Spezies: Stammbaum der untersuchten Spezies durch Klasse, Ordnung, Unterordnung, Familie und Art und die entsprechenden lateinischen Begriffe (Grizmeck 1967) dargestellt.

Tierart	Lateinischer Name	Zahl	Gewicht (kg)	Kopf-Rumpf-Länge (cm)	Lebenserwartung (J)	Bewegungsmuster
Breitmaulnashorn	Ceratotherium simum	1	1200	2500*	40*	quadruped
Hausrind	Bos primigenus domesticus	1	558,0	300*	30*	quadruped
Hauspferd	Equus caballus przewalskii	1	535,0	280*	25*	quadruped
Schwarzbär	Ursus americanus	1	120,0	150*	12*	fakultativ biped
Hausschwein	Sus scrofa domesticus	1	110,5	130*	20*	Quadruped
Mensch	Homo sapiens sapiens	E <sup>1</sup> : 2 E <sup>2</sup> : 10 K: 142	E <sup>1</sup> : 73,5 E <sup>2</sup> : 84 K: 70,8	175**	75*	biped
Schimpanse	Pan troglodytes	3	31,17	70*	50*	fakultativ biped
Haushund	Canis familiaris	5	E: 23,5 K: 26,1	60 – 120*	15*	quadruped
Pavian	Papio Cynocephalus	1	22,5	65*	20*	fakultativ biped
Biber	Castor fiber	1	15,0	60*	15*	fakultativ biped
Mandrill	Mandrillus sphinx	1	7,5	60*	20*	fakultativ biped
Wildkatze	Felis silvestris	1	4,5	60*	14*	quadruped
Hauskatze	Felis catus	2	4,1	50*	12*	quadruped
Hauskaninchen	Oryctolagus cuniculus	1	2,5	40*	6*	fakultativ biped

**Tab. 4.1. Untersuchte Spezies:**

Auflistung der untersuchten Tierarten mit Anzahl der untersuchten Individuen, Körpergewicht, Kopf-Rumpf-Länge, Lebenserwartung und Bewegungsmuster. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies sind für das Körpergewicht die Mittelwerte angegeben. Bei unterschiedlichen Kollektiven für Ellbogen und Kniegelenk einer Spezies sind die Mittelwerte getrennt angegeben (E = Ellbogen, K = Knie).

\*Bei den Werten für die Kopf-Rumpf-Länge und die Lebenserwartung handelt es sich um Angaben aus der Literatur (Grizmeck 1967).

\*\* Beim Menschen handelt es sich um die Körpergröße.

Bei den Angaben für das Ellbogengelenk E<sup>1</sup> handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei E<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).

## 4.2. Methoden

### 4.2.1. Magnetresonanztomographie

#### 4.2.1.1. Datenakquisition

Die Daten wurden mit einem 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen (Magnetom Vision, Siemens, Erlangen) am Institut für klinische Radiologie der Universitätsklinik Großhadern (Ludwig-Maximilians-Universität, München) akquiriert. Je nach Größe des jeweiligen Gelenks wurden verschiedene Spulen verwendet (Körperspule, Extremitätenspule und Oberflächenspule). Die Datenakquisition in sagittaler Schnittführung erfolgte mit einer zuvor validierten (Graichen et al. 2000; Burgkart et al. 2001; Glaser et al. 2001; Graichen et al. 2004) T1-gewichteten FLASH (Fast Low Angle Shot) 3D-Sequenz mit selektiver Wasseranregung (TR = 17,2 ms, TE = 6,6 ms, FA = 20°). Je nach Größe der Gelenke wurden Field of view (FOV), Auflösung in der Bildebene (in plane resolution) und Schichtdicke modifiziert (Tab. 4.2.), um für die digitale Bildverarbeitung eine ausreichende Voxelzahl pro Knorpelfläche zu erhalten. Dadurch ergaben sich Auflösungen von 0,25 x 0,25 x 1,0 mm<sup>3</sup> (Kaninchen) bis 0,59 x 0,59 x 2,34 mm<sup>3</sup> (Breitmaulnashorn) (Tab. 4.2.) Dies war mit Akquisitionszeiten zwischen 8,04 und 19,40 Minuten vereinbar (Tab. 4.2.). Um die Segmentierbarkeit zu verbessern und die Subvoxelauflösung zu nutzen (Al Ali et al. 2002), wurden die Bilddaten der kleinen Spezies vor der digitalen Bildverarbeitung auf 640 x 640 Voxel in der Bildebene interpoliert.

Als Maße für die Knorpelmorphologie wurden die Größe der Knorpel-Knochen-Grenze, die Größe der Gelenkfläche und die mittlere Knorpeldicke betrachtet. Die KKG ist am intakten Gelenk ein geeignetes Maß zur Beschreibung der überknorpelten Knochenfläche und ist mit der Gelenkflächengröße extrem hoch korreliert. Daher wurde im Folgenden nur die Größe der KKG angegeben.

Spezies	Extremität	Spule	FOV (mm)	Schichtdicke (mm)	Auflösung (mm)	Auflösung (interpol.) (mm)	Akquisitionszeit (min,sec)
Breitmaulnashorn	Vorderlauf	K.S.	160	2,00	0,56	0,25	18,50
	Hinterlauf	K.S.	300	2,34	0,59	0,47	8,04
Hausrind	Vorderlauf	E.S.	160	1,50	0,31	0,25	9,15
	Hinterlauf	E.S.	160	1,88	0,31	-	9,15
Hauspferd	Vorderlauf	E.S.	160	1,50	0,31	-	9,15
	Hinterlauf	E.S.	180	2,03	0,35	-	9,15
Schwarzbär	Vorderlauf	-	-	-	-	-	-
	Hinterlauf	E.S.	160	1,5	0,31	-	9,15
Hausschwein	Vorderlauf	E.S.	160	1,5	0,31	0,25	9,18
	Hinterlauf	E.S.	160	1,25	0,31	-	9,15
Mensch	Vorderlauf	E.S.	130	1,00	0,25	-	9,50
	Hinterlauf	E.S.	160	1,5	0,31	-	9,15
Schimpanse	Vorderlauf	E.S.	130	1,00	0,25	-	9,50
	Hinterlauf	E.S.	130	1,00	0,25	-	9,50
Haushund	Vorderlauf	E.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
	Hinterlauf	E.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
Pavian	Vorderlauf	E.S.	130	1,00	0,25	0,20	9,50
	Hinterlauf	E.S.	130	1,00	0,25	-	9,50
Biber	Vorderlauf	E.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
	Hinterlauf	E.S.	160	1,00	0,25	-	19,40
Mandrill	Vorderlauf	E.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
	Hinterlauf	E.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
Wildkatze	Vorderlauf	O.S.	130	1,00	0,25	0,20	18,26
	Hinterlauf	O.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
Hauskatze	Vorderlauf	O.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
	Hinterlauf	O.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40
Hauskaninchen	Vorderlauf	-	-	-	-	-	-
	Hinterlauf	O.S.	130	1,00	0,25	0,20	19,40

**Tab. 4.2. Modifikationen MRT- Sequenz:**

Auflistung der Modifikationen der MRT-Sequenz für die einzelnen Tierarten. Es sind die verwendete Spule (K.S. = Körperspule, E.S. = Extremitätenspule, O.S. = Oberflächenspule), das Field of view (FOV), die In-plane-Auflösung, die Schichtdicke, die in-plane Auflösung nach Interpolation und die Akquisitionszeit angegeben.

#### 4.2.1.2. Digitale Bildverarbeitung:

Die Bilddaten wurden im DICOM Format mit DAT-Bändern auf einen Hochleistungsgraphikrechner (Octane Duo, Silicon Graphics, Mountain View, CA, USA) überspielt und anschließend in ein Format umgewandelt, das von der Bildbearbeitungssoftware gelesen werden kann.

Mit der Bildbearbeitungssoftware "Medvis" wurde der Gelenkknorpel Schicht für Schicht halbautomatisch mit einem "B-Spline Snake" Algorithmus segmentiert. Dieser

Algorithmus basiert auf einem Zusammenspiel von "Bildkräften" (Grauwertinformationen des MRT-Bildes) und "Modellkräften". Dabei markiert der Benutzer zunächst manuell die Knorpel-Knochengrenze und die Knorpeloberfläche in einer Schicht. Diese Markierung wird als B-Spline-Kurve parameterisiert und tastet sich durch einen hierarchischen Filterungsprozess stufenweise an die Kanten der zu segmentierenden benachbarten Knorpel-Knochengrenze und Gelenkfläche heran (Stammberger et al. 1999b). Diese Kontur ist zusätzlich über eine Euklidische Abstandsmessung an das segmentierte Bild der vorhergehenden Schicht gekoppelt, da von einer geringen Formveränderung des Knorpels zwischen benachbarten Schichten ausgegangen wird. Die resultierende Kontur wird wiederum in die nächste Schicht übernommen und dient dort als Ausgangspunkt für die weitere Segmentierung. Das errechnete Ergebnis kann manuell korrigiert werden, was vor allem in Rand- oder Kontaktzonen des Knorpels notwendig ist. Die Segmentierung wird also von drei Faktoren beeinflusst, den Bildkräften (Grauwertgradienten), den Modellkräften (Steifigkeit der initialen Kontur, die ein Ausreißen hin zu starken Grauwertgradienten anderer Bildobjekte verhindert) und den Koppelungskräften (weitgehende Übereinstimmung benachbarter Schichten).

Für die dreidimensionale Rekonstruktion der Gelenkflächen wurde durch Interpolierung der segmentierten Daten isotrope Voxel (Bildquader mit gleicher Kantenlänge) erzeugt. Durch numerische Integration dieser Voxel wurden dann die Knorpelvolumina errechnet (Eckstein et al. 2001a). Die Größe der Gelenkfläche wurde durch Triangulierung der Knochen-Knorpelgrenze und der Gelenkoberfläche der zuvor segmentierten Knorpelplatten bestimmt (Hohe et al. 2002). Die Dicke des Knorpels wurde durch dreidimensionale Euklidische Distanzformation, also unabhängig von der Lage, Orientierung und Kippung der Schichtbilder berechnet (Stammberger et al. 1999a).

#### 4.2.1.3. Statistische Auswertung

Die Größe der Knorpel-Knochen-Grenze des gesamten Ellenbogen- bzw. Kniegelenkes wurden durch Summierung der Werte der Einzelflächen (Humerus, Radius, Ulna bzw. Femur, Tibia, Patella) berechnet. Für die mittlere Knorpeldicke des Gesamtgelenkes wurden Mittelwerte mit Gewichtung der Einzelflächen entsprechend ihrer Anteile am Gesamtgelenk gebildet (Eckstein et al. 2001a). Bei mehreren Exemplaren einer Tierart wurden für das Körpergewicht und die Morphologieparameter Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet.

Die Werte für die KKG der aus der Studie von Springer übernommenen Daten für das menschliche Ellbogengelenk ( $n = 10$ ) wurden mit Hilfe einer Dreisatzrechnung ermittelt ( $KKG = Vol/MD$ ).

Zur Beurteilung der Zusammenhänge von Morphologieparametern und möglichen Einflussparametern (Körpergewicht, Bewegungsmuster, Lebenserwartung) wurden Pearson Korrelationskoeffizienten gebildet. Bildlich wurden diese Zusammenhänge mit einer Regressionsgerade in logarithmischen bzw. linearen Diagrammen dargestellt.

Zur Beschreibung des Zusammenhangs der Knorpelmorphologie des Ellbogen-, und Kniegelenkknorpels wurden für die Knorpel-Knochen-Grenze und die mittlere Knorpeldicke die Verhältnisse zwischen Kniegelenk und Ellbogengelenk ( $1 : x$ ) berechnet.



## 5. Ergebnisse

### 5.1. Ellbogengelenk

Bei der Größe der Knorpel-Knochen-Grenzen (KKG) am Ellbogen zeigten sich erwartungsgemäß deutliche Größenunterschiede innerhalb der untersuchten Säugetierspezies. Der Biber wies dabei die kleinste (2,43 cm<sup>2</sup> (KKG) bzw. 2,56 mm<sup>2</sup> (GF)) und das Breitmaulnashorn die größte Gesamtfläche der in dieser Studie untersuchten Spezies (266 cm<sup>2</sup> (KKG) bzw. 275 cm<sup>2</sup> (GF)) auf (Tab 5.1.). Die Größen von KKG und GF wiesen sehr hohe Korrelationen auf ( $r = 1,0$  am Ellbogen und am Knie), so dass im Folgenden nur die Werte der KKG als Maß für die Gelenkflächengröße angegeben werden.

Die mittlere Gelenkknorpeldicke (MD) rangierte bei den untersuchten Spezies zwischen 0,53 mm  $\pm$ 0,19 bei der Hauskatze und 1,25 mm beim Breitmaulnashorn (Tab 5.1.) und das Knorpelvolumen zwischen 132 mm<sup>3</sup>  $\pm$ 13,74 bei der Katze und 34596 mm<sup>3</sup> beim Breitmaulnashorn (Tab 5.1.).

Es zeigte sich eine hohe und signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße bei den untersuchten Spezies, sowohl bei Einschluss ( $r = 0,96$ ,  $p < 0,001$ ), als auch bei Ausschluss ( $r = 0,69$ ,  $p < 0,05$ ) der hominoiden Spezies, sowie bei Ausschluss aller bipeder / fakultativ bipeder Spezies ( $r = 0,95$ ,  $p < 0,001$ ). (Abb. 5.1.). Zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke konnte eine geringe positive Korrelation gezeigt werden ( $r = 0,57$ ,  $p < 0,05$ ), die unter Ausschluss aller bipeder Spezies höher war ( $r = 0,80$ ,  $p < 0,01$ ) (Abb. 5.2.).

Es konnte eine signifikante, positive Korrelation zwischen durchschnittlicher Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke festgestellt werden ( $r = 0,72$ ,  $p < 0,01$ ) (Abb. 5.3.), diese Korrelation und das Signifikanzniveau waren höher ohne Einbeziehung des Menschen ( $r = 0,79$ ,  $p < 0,01$ ). Bei Einbeziehung des Menschen mit

---

seiner Lebenserwartung von vor ca. 100 Jahren (47 statt 75 Jahren) war eine höhere Korrelation zu finden ( $r = 0,81$ ,  $p < 0,0001$ ). Zwischen Lebenserwartung Gelenkflächengröße konnte weder mit ( $r = 0,30$ ,  $p = 0,35$ ) noch ohne Einschluss des Menschen ( $r = 0,55$ ,  $p = 0,08$ ) ein signifikanter Zusammenhang beschrieben werden.

Bei Mensch (obligat biped), Schimpansen und Mandrill (fakultativ biped) war das Verhältnis Körpergewicht zu Gelenkflächengröße des Ellbogens etwas kleiner als bei den anderen untersuchten Spezies, das heißt, die gesamte Gelenkfläche war in Relation zum Körpergewicht größer (Tab. 5.2. & Abb. 5.1). Beim fakultativ bipeden Biber war dieses Verhältnis größer, das heißt die Gelenkfläche war im Verhältnis zum Körpergewicht kleiner, als bei den übrigen untersuchten Spezies. Bei Mensch und Schimpansen war auch das Verhältnis Körpergewicht zu mittlerer Knorpeldicke kleiner, das heißt es zeigte sich eine größere mittlere Knorpeldicke, als bei den anderen Spezies (Tab. 5.2. & Abb. 5.2).

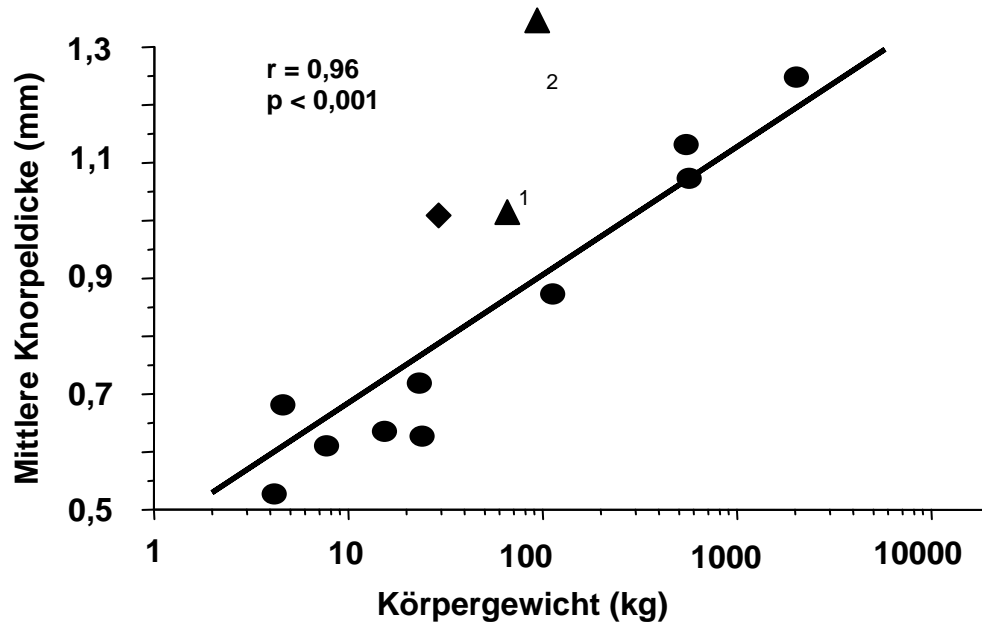
Spezies	N	Gewicht (kg)	Lebenserwartung (J)*	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MD (mm)
Breitmaulnashorn	1	2000	40	266	275	34596	1,25
Hausrind	1	558	30	147	148	15275	1,07
Hauspferd	1	535	25	121	124	14106	1,14
Hausschwein	1	111	20	40,9	42,8	3638	0,87
Mensch <sup>1</sup>	2	74 ±7,8	75 47**	30,3 ±4,48	33,1 ±4,73	3439 ±860	1,12 ±0,12
Mensch <sup>2</sup>	10	84 ±18	75 47**	43,1	-	5270 ±1040	1,22 ±0,09
Schimpanse	3	31 ±17,9	50	23,9 ±4,98	26,2 ±5,04	2486 ±361	1,02 ±0,05
Haushund	5	24 ±12,3	15	10,9 ±5,65	10,4 ±5,96	718 ±490	0,63 ±0,09
Pavian	1	23	20	12,6	13,1	911	0,72
Biber	1	15	15	2,43	2,56	155	0,64
Mandrill	1	7,5	20	8,91	9,15	543	0,61
Wildkatze	1	4,5	15	2,90	3,27	198	0,68
Hauskatze	2	4,1 ±0,07	12	2,70 ±1,03	2,89 ±1,09	132 ±14	0,53 ±0,19

**Tab. 5.1. Daten Ellbogengelenk:**

Absolutwerte für Körpergewicht, Größe der Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol) und mittlere Knorpeldicke (MD). Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte gebildet. Diese Werte sind zusätzlich durch die Standardabweichungen beschrieben. Der Wert für die mittlere Knorpeldicke errechnet sich aus den gewichteten Werten der Einzelflächen (Eckstein et al. 2001a). Bei Mensch<sup>1</sup> handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei Mensch<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).

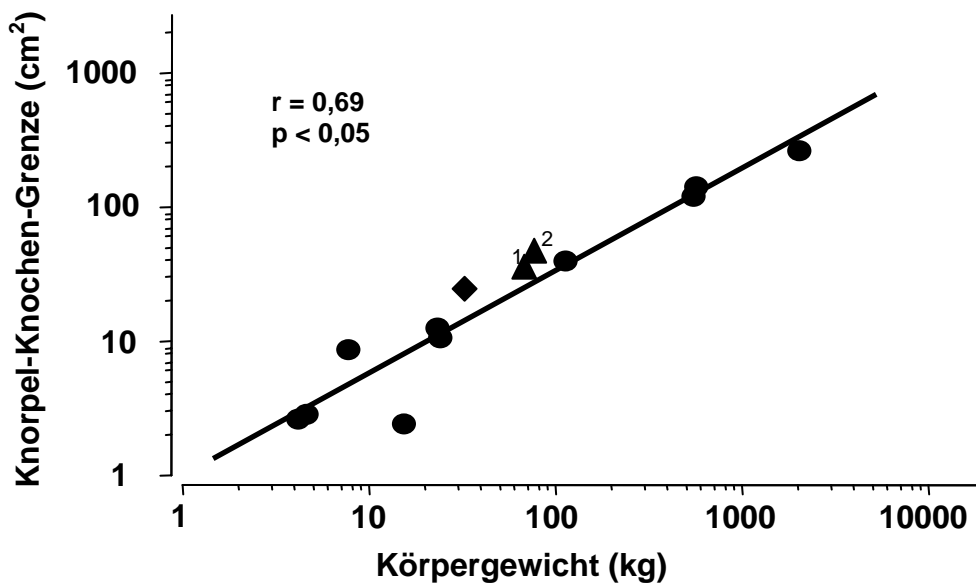
\*Bei den Werten für die Lebenserwartung handelt es sich um Angaben aus der Literatur (Grizmeck 1967).

\*\*Lebenserwartung des Menschen vor 100 Jahren.



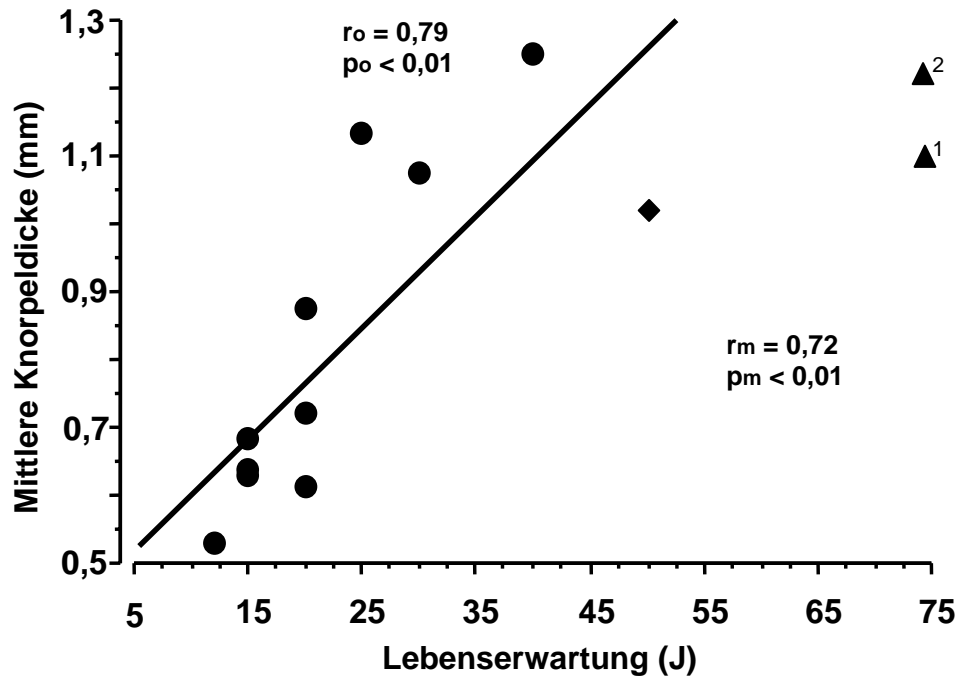
**Abb. 5.1. Knorpeldicke und Körpergewicht am Ellbogengelenk:**

Das Verhältnis von mittlerer Gelenkknorpeldicke (lineare Einheit) und Körpergewicht (logarithmische Einheit) ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch  $\blacktriangle^1$  (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw.  $\blacktriangle^2$ , (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch  $\blacklozenge$  gekennzeichnet.



**Abb. 5.2. Gelenkflächengröße und Körpergewicht am Ellbogengelenk:**

Das Verhältnis von Gelenkflächengröße (KKG) und Körpergewicht (in logarithmischen Einheiten) ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch  $\blacktriangle^1$  (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw.  $\blacktriangle^2$ , (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch  $\blacklozenge$  gekennzeichnet.



**Abb. 5.3. Knorpeldicke und Lebenserwartung am Ellbogengelenk:**  
 Das Verhältnis von mittlerer Gelenkknorpeldicke (lineare Einheit) und Lebenserwartung (logarithmische Einheit) ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch  $\blacktriangle^1$  (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw.  $\blacktriangle^2$ , (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch  $\blacklozenge$  gekennzeichnet.  $r_m$  bzw.  $p_m$  : mit Mensch,  $r_o$  bzw.  $p_o$  : ohne Mensch.

Spezies	Gangart	Verhältnis Körpergewicht/ Gelenkflächengröße kg / cm <sup>2</sup>	Verhältnis Körpergewicht/ Mittlere Knorpeldicke kg / mm
Nashorn	quadruped	75,2	1599
Hausrind	quadruped	38,0	519
Hauspferd	quadruped	44,2	471
Hausschwein	quadruped	27,0	126
Mensch <sup>1</sup>	biped	15,6	65,4
Mensch <sup>2</sup>	biped	19,3	68,3
Schimpanse	fakultativ biped	13,04	30,4
Haushund	quadruped	21,61	37,3
Pavian	fakultativ biped	17,92	31,2
Biber	fakultativ biped	61,61	23,5
Mandrill	fakultativ biped	8,41	12,2
Wildkatze	quadruped	15,53	6,6
Hauskatze	quadruped	14,98	7,6

**Tab. 5.2. Verhältnisse am Ellbogengelenk:**  
 Das Verhältnis von Körpergewicht und Gelenkflächengröße bzw. mittlerer Knorpeldicke bei den bipeden, fakultativ bipeden und quadrupeden Säugetieren in kg / cm<sup>2</sup> bzw. kg / mm.

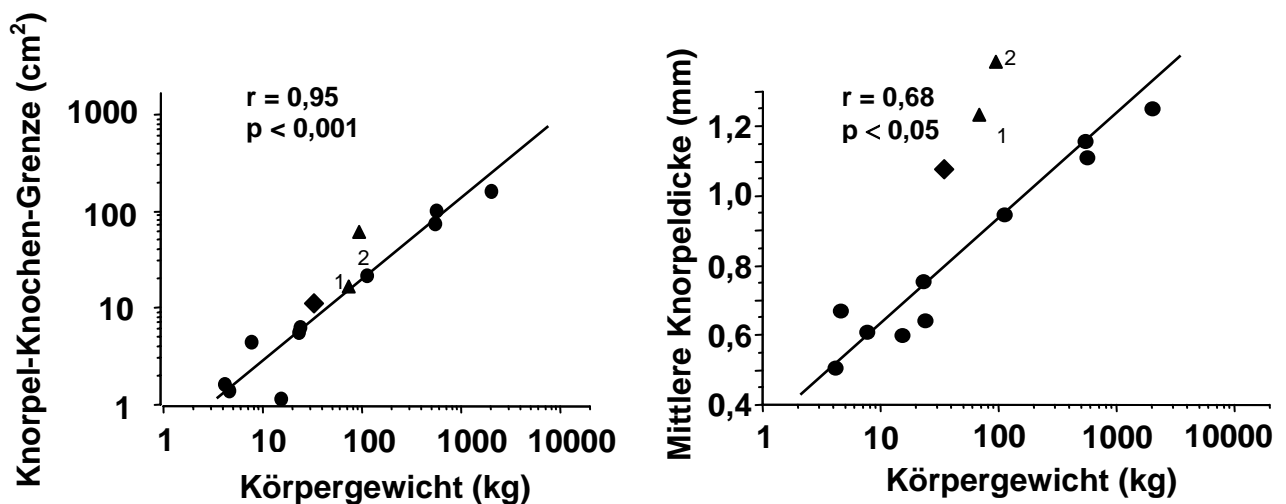
### 5.1.1. Humerus

Am humeralen Gelenkknorpel zeigten sich für die Gelenkflächengröße (KKG) Werte zwischen 1,15 cm<sup>2</sup> beim Biber und 167 cm<sup>2</sup> beim Nashorn (Tab. 5.3.). Für die mittlere Knorpeldicke ergaben sich ebenfalls die kleinsten Werte bei der Katze (0,51 mm ±0,17) und die größten beim Nashorn (1,26 mm) und Mensch<sup>2</sup> (1,35 mm ±0,11) (Tab.5.3.). Auch am Humerus fand sich eine signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße ( $r = 0,95$ ,  $p < 0,001$ ) und eine gering positive Korrelation zwischen Körpergewicht und mittlerer Dicke ( $r = 0,48$ ,  $p < 0,05$ ) (Abb. 5.4. a & b), die Korrelation zwischen Körpergewicht und mittlerer Dicke war innerhalb der nicht-hominoiden Spezies signifikant positiv ( $r = 0,68$ ,  $p < 0,05$ ). Es fand sich eine positive Korrelation zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke sowohl mit der aktuellen Lebenserwartung des Menschen ( $r = 0,78$ ,  $p < 0,01$ ) und eine etwas höhere mit der Lebenserwartung des Menschen vor 100 Jahren ( $r = 0,84$ ,  $p = 0,0005$ ) die innerhalb der nicht-hominoiden Spezies ausgeprägter war ( $r = 0,90$ ,  $p < 0,001$ ) (Abb. 5.4. c) aber keine signifikante Korrelation zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße (mit Mensch:  $r = 0,24$ ,  $p = 0,46$ , ohne Mensch:  $r = 0,54$ ,  $p = 0,09$ , Lebenserwartung vor 100 Jahren:  $r = 0,4$ ,  $p = 0,23$ ).

Spezies	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MD (mm)
Breitmaulnashorn	167	175	21671	1,26
Hausrind	104	104	11029	1,11
Hauspferd	76,2	79	8808	1,16
Hausschwein	22,0	233	2117	0,95
Mensch <sup>1</sup>	17,0	189	2135	1,27
	±3,98	±4,50	±785	±0,23
Mensch <sup>2</sup>	21,9	-	2960	1,35
			±460	±0,11
Schimpanse	11,5	12,95	1227	1,08
	±176,31	±2,14	±101	±0,07
Haushund	6,52	6,91	441	0,64
	±3,75	±4,06	±346	±0,12
Pavian	5,64	6,02	425	0,75
Biber	1,15	1,24	73	0,60
Mandrill	4,60	4,70	279	0,61
Wildkatze	1,44	1,66	97	0,67
Hauskatze	1,66	6,91	78	0,51
	±0,96	±1,01	±21	±0,17

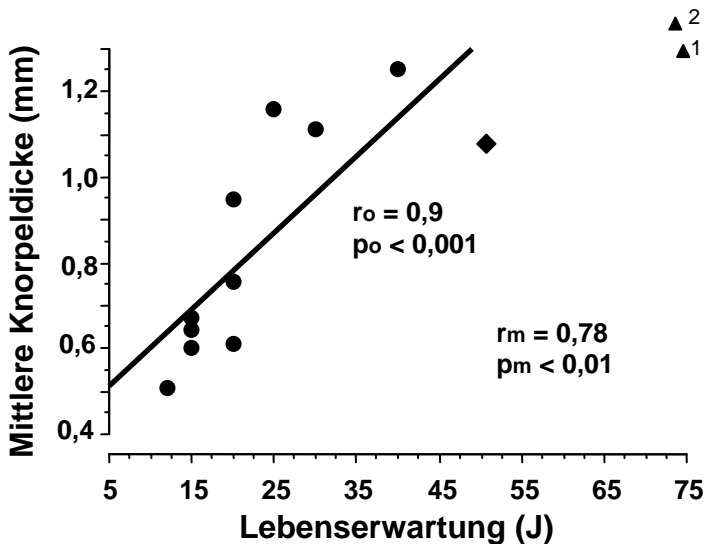
**Tab. 5.3. Ergebnisse humerale Gelenkfläche:**

Größe der Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol), und mittlere Knorpeldicke (MD). Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte und Standardabweichung gebildet. Bei Mensch<sup>1</sup> handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei Mensch<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).



**Abb. 5.4. a & b Graphen Humerale Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von Gelenkflächengröße (KKG) (logarithmisch) bzw. mittlerer Knorpeldicke (linear) zum Körpergewicht ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ▲<sup>1</sup> (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw. ▲<sup>2</sup>, (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch ◆ gekennzeichnet.



**Abb. 5.4. c: Graph humerale Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von mittlerer Knorpeldicke zur Lebenserwartung ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch  $\blacktriangle^1$  (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw.  $\blacktriangle^2$ , (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch  $\blacklozenge$  gekennzeichnet.  $r_m$  bzw.  $p_m$  : mit Mensch,  $r_o$  bzw.  $p_o$  : ohne Mensch.

### 5.1.3. Radius

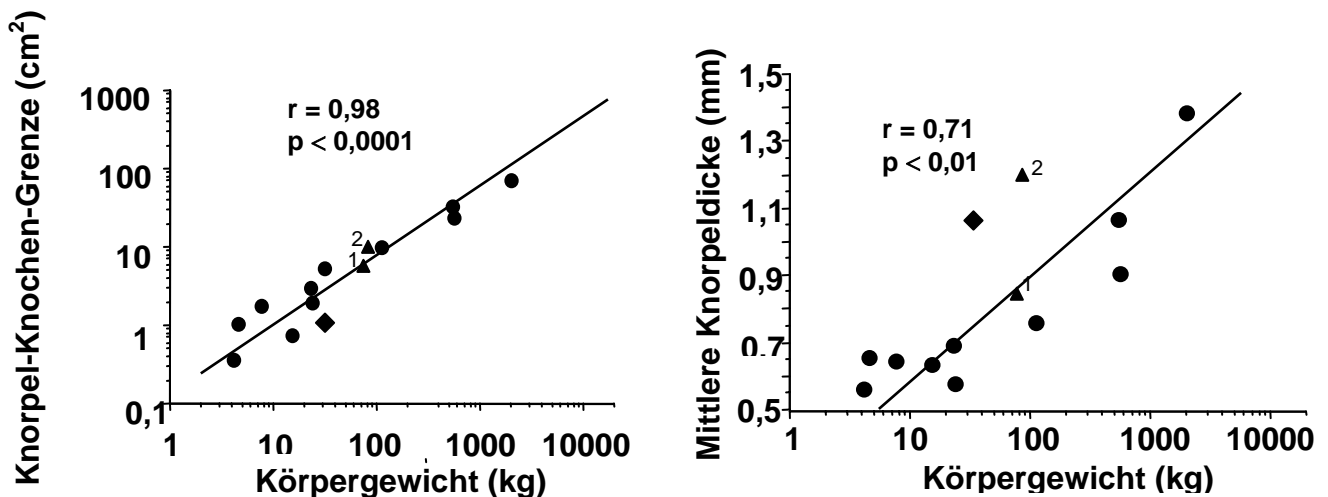
Am Radius ergaben sich für die Gelenkflächengröße (KKG) und die mittlere Knorpeldicke wiederum die kleinsten Werte bei der Katze ( $0,37 \text{ mm}^2$  bzw.  $0,56 \text{ mm}$ ) und die größten beim Nashorn ( $72,4 \text{ mm}^2 \pm 6,12$  bzw.  $1,39 \text{ mm} \pm 0,19$ ) (Tab. 5.4.). Es zeigte sich auch am Radius eine signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße ( $r = 0,98$ ,  $p < 0,001$ ) und eine signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke bei den nicht-hominoiden Spezies ( $r = 0,71$ ,  $p < 0,01$ ). Mit Einbeziehung aller Spezies konnte nur ein geringer, positiver Zusammenhang zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke beschrieben werden ( $r = 0,54$ ,  $p < 0,068$ ) (Abb. 5.4. a & b). Am Radius zeigte sich nur eine geringe positive Korrelation zwischen der Lebenserwartung und der mittleren Knorpeldicke mit der aktuellen Lebenserwartung beim Menschen ( $r = 0,54$ ,  $p < 0,068$ ) und der vor 100 Jahren ( $r = 0,74$ ,  $p = 0,007$ ) die unter Einbeziehung der nicht-hominoiden Spezies deutlich ausgeprägter war ( $r = 0,98$ ,  $p < 0,001$ ) und keine signifikante Korrelation zwischen der Lebenserwartung und der Gelenkflächengröße (mit Mensch:  $r = 0,23$ ,  $p = 0,49$ , ohne Mensch:  $r = 0,53$ ,  $p = 0,09$ , Lebenserwartung vor 100 Jahren:  $r = 0,39$ ,  $p = 0,25$ ).



Spezies	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MD (mm)
Breitmaulnashorn	72,4	74,1	10648	1,39
Hausrind	24,1	24,5	2183	0,91
Hauspferd	33,0	32,8	3866	1,07
Hausschwein	10,1	10,4	783	0,76
Mensch <sup>1</sup>	5,02 ±0,81	5,42 ±87,4	470 ±154	0,85 ±0,10
Mensch <sup>2</sup>	8,50	-	1020 ±110	1,20 ±0,11
Schimpanse	5,25 ±1,59	5,89 ±1,77	604 ±153	1,07 ±0,05
Haushund	1,97 ±1,25	1,99 ±1,25	118 ±76	0,58 ±0,01
Pavian	3,06	3,18	220	0,69
Biber	0,73	0,76	47	0,63
Mandrill	1,81	1,83	119	0,65
Wildkatze	1,07	1,17	70	0,65
Hauskatze	0,37 ±0,06	0,37 ±0,06	19 ±1,5	0,56 ±0,19

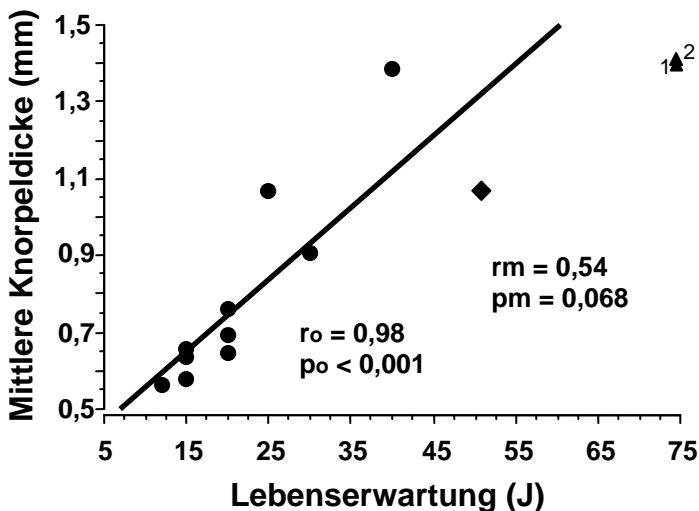
**Tab. 5.4. Ergebnisse radiale Gelenkfläche:**

Größe der Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol), und mittlere Knorpeldicke (MD) des radialen Gelenkknorpels. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte und Standardabweichung gebildet. Bei Mensch<sup>1</sup> handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei Mensch<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).



**Abb. 5.5. a & b Graphen radiale Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von Gelenkflächengröße (KKG) (logarithmisch) bzw. mittlerer Knorpeldicke (linear) zum Körpergewicht am Radius ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ▲<sup>1</sup> (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw. ▲<sup>2</sup>, (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch ◆ gekennzeichnet.



**Abb. 5.5. c Graph radiale Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von mittlerer Knorpeldicke zur Lebenserwartung am Humerus ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch  $\blacktriangle^1$  (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw.  $\blacktriangle^2$ , (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch  $\blacklozenge$  gekennzeichnet.  $r_m$  bzw.  $p_m$ : mit Mensch.  $r_o$  bzw.  $p_o$ : ohne Mensch.

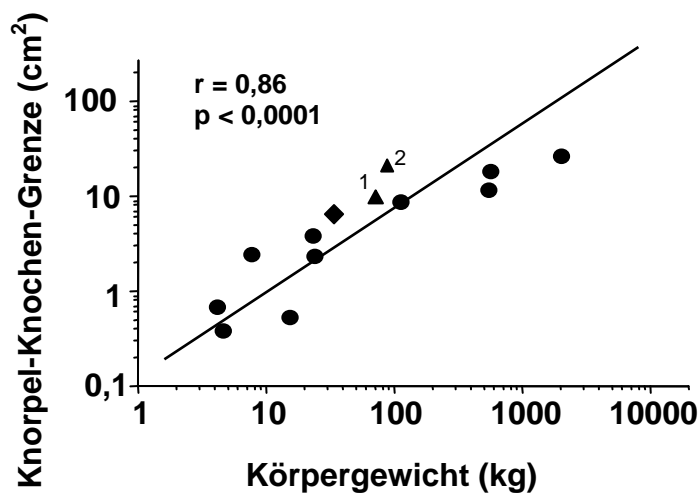
### 5.1.2. Ulna

Auch beim ulnaren Gelenkknorpel zeigten sich für die Gelenkflächengröße (KKG) der kleinste Wert bei der Wildkatze ( $0,39 \text{ cm}^2$ ) und der größte beim Nashorn ( $26,6 \text{ cm}^2$ ) (Tab 5.5.). Bei der mittleren Knorpeldicke wies die Katze den kleinsten ( $0,56 \text{ mm} \pm 0,20$ ) und das Pferd den größten Wert ( $1,17 \text{ mm}$ ) auf (Tab 5.5.). An der Ulna zeigte sich ebenfalls eine signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße ( $r = 0,86$ ,  $p < 0,0001$ ) (Abb. 5.6.), aber keine signifikante Korrelation zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke, weder zwischen den nicht-hominoiden Spezies ( $r = 0,42$ ,  $p = 0,10$ ), noch mit Einbeziehung aller Spezies ( $r = 0,35$ ,  $p = 0,42$ ). An der Ulna konnte keine signifikante Korrelation zwischen der Lebenserwartung und der mittleren Knorpeldicke ( $r = 0,49$ ,  $p = 0,11$ ) bzw. der Gelenkflächengröße ( $r = 0,41$ ,  $p = 0,19$ ) nachgewiesen werden. Bei den nicht-hominoiden Spezies ( $r = 0,68$ ,  $p = 0,07$ ) konnte zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke und auch zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße ( $r = 0,65$ ,  $p = 0,03$ ) eine positive Korrelation gefunden werden.

Spezies	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MD (mm)
Breitmaulnashorn	26,6	26,42	2278	0,85
Hausrind	18,7	18,65	2063	1,08
Hauspferd	11,8	11,76	1431	1,17
Hausschwein	8,75	9,06	738	0,82
Mensch <sup>1</sup>	8,28 ±0,29	8,78 ±0,64	835 ±79	0,96 ±0,12
Mensch <sup>2</sup>	12,7	-	1410 ±100	1,11 ±0,04
Schimpanse	7,13 ±2,15	7,21 ±2,10	654 ±170	0,89 ±0,02
Haushund	2,39 ±0,67	2,50 ±0,75	158 ±72	0,65 ±0,08
Pavian	3,86	3,90	266	0,70
Biber	0,55	0,56	36	0,71
Mandrill	2,50	2,63	146	0,59
Wildkatze	0,39	0,44	32	0,79
Hauskatze	0,68 ±0,02	0,73 ±0,02	35 ±5,8	0,56 ±0,20

**Tab. 5.5. Ergebnisse ulnare Gelenkfläche:**

Größe der Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol), und mittlere Knorpeldicke (MD) des ulnaren Gelenkknorpels. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte und Standardabweichung gebildet. Bei Mensch<sup>1</sup> handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei Mensch<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).



**Abb. 5.6 Graph ulnare Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von Gelenkflächen­größe (KKG) (logarithmisch) bzw. mittlerer Knorpeldicke (linear) zum Körpergewicht an der Ulna ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch  $\blacktriangle^1$  (Mittelwerte aus 2 Individuen) bzw.  $\blacktriangle^2$ , (Datenbank aus Studie Springer) der Wert des Schimpansen durch  $\blacklozenge$  gekennzeichnet.

#### 5.1.4. Prozentuale Verteilung der einzelnen Gelenkfläche an der Gesamtfläche

Für die prozentuale Verteilung der Gelenkflächen an den Einzelflächen des Ellbogengelenks wies bei allen untersuchten Spezies der humerale Gelenkknorpel den größten Flächenanteil auf. Die Werte angierten zwischen 45% beim Pavian und 71% beim Rind. Bei den obligat bzw. fakultativ bipeden Spezies betrug der Anteil des Humerus 45% - 56%, bei den quadrupeden Spezies 54% - 71%. Den zweitgrößten Flächenanteil nahm bei allen Spezies der Radius ein (zwischen 14% bei der Katze und 37% bei der Wildkatze, obligat bzw. fakultativ bipede Spezies 17% - 37%, quadrupede Spezies 14% - 37%). Der ulnare Gelenkknorpel zeigte bei allen Spezies den geringsten Anteil an der Gesamtknorpelfläche (zwischen 10% bei Nashorn und Pferd und 30% beim Schimpanse, obligat bzw. fakultativ bipede Spezies 13% - 30%, quadrupede Spezies 10% - 25%) (Tab. 5.7.).

Spezies	Körpergewicht (kg)	Gangart	Humerus %	Radius %	Ulna %
Mensch <sup>1</sup>	71 ±13	biped	56 ±13	17 ±2,7	27 ±1,0
Mensch <sup>2</sup>	84 ±18	biped	51	20	29
Schimpanse	31 ±18	fakultativ biped	48 ±7,5	22 ±6,7	30 ±9,2
Pavian	23	fakultativ biped	45	24	31
Biber	15	fakultativ biped	47	30	23
Mandrill	7,5	fakultativ biped	52	20	28
Breitmaulnashorn	1200	quadruped	63	27	10
Hausrind	558	quadruped	71	16	13
Hauspferd	535	quadruped	63	27	10
Hausschwein	111	quadruped	54	25	21
Haushund	26 ±12	quadruped	60 ±34	18 ±12	22 ±6,3
Wildkatze	4,5	quadruped	50	37	13
Hauskatze	4,1 ±0,1	quadruped	61 ±33	14 ±2,2	25 ±0,7

**Tab. 5.6. Prozentuale Verteilung der Gelenkflächengröße am Ellbogengelenk:**

Die prozentuale Verteilung der Gelenkflächengrößen (KKG) an den Einzelflächen des Ellbogengelenks in %. Bei Mensch<sup>1</sup> handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei Mensch<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).

### 5.1.5. Mittlere Gelenkknorpeldicke an den Einzelflächen

Beim Ellbogengelenk von Mensch, Pavian, Rind und Schwein zeigte sich am Humerus die größte mittlere Knorpeldicke (0,75 mm – 1,35 mm). Bei Schimpanse, Mandrill, Nashorn und Pferd wurden am Radius die größten Werte für die mittlere Knorpeldicke gefunden (0,66 mm – 1,53 mm). Biber, Hund, Wildkatze und Katze wiesen an der Ulna die größten mittleren Knorpeldicken auf (0,56 mm – 0,79 mm).

Spezies	Körperge- wicht (kg)	Gangart	Humerus (mm) %	Radius (mm) %	Ulna (mm) %	MD 100%
<b>Mensch<sup>1</sup></b>	71	biped	1,27 113	0,95 95,5	0,96 85,3	1,12
<b>Mensch<sup>2</sup></b>	84	biped	1,35 110	1,20 97,6	1,11 90,2	1,23
<b>Schimpanse</b>	31	fakultativ biped	1,08 105	1,19 105	0,89 86,9	1,02
<b>Pavian</b>	23	fakultativ biped	0,75 104	0,74 95,6	0,70 97,0	0,72
<b>Biber</b>	15	fakultativ biped	0,60 94,7	0,64 100	0,71 112	0,64
<b>Mandrill</b>	7,5	fakultativ biped	0,61 99,7	0,66 105	0,59 96,8	0,61
<b>Breitmaulnashorn</b>	1200	quadrupe	1,26 100	1,53 111	0,85 68,1	1,25
<b>Hausrind</b>	558	quadrupe	1,11 104	0,93 85,0	1,08 100	1,07
<b>Hauspferd</b>	535	quadrupe	1,16 102	1,18 94,1	1,17 102	1,14
<b>Hausschwein</b>	111	quadrupe	0,95 109	0,78 87,0	0,82 93,4	0,87
<b>Haushund</b>	26 ± 12	quadrupe	0,64 102	0,62 91,6	0,65 102	0,63
<b>Wildkatze</b>	4,5	quadrupe	0,67 98,6	0,67 95,9	0,79 116	0,68
<b>Hauskatze</b>	4,1 ± 0,1	quadrupe	0,51 95,6	0,54 106	0,56 105	0,53

**Tab. 5.7. Mittlere Knorpeldicke an den Einzelflächen des Ellbogengelenks:**

Die Verteilung der MD an den Einzelflächen des Ellbogengelenks in mm und %. Bei Mensch<sup>1</sup> handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei Mensch<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).

### 5.2. Kniegelenk

Auch am Kniegelenk waren deutliche Größenunterschiede der gesamten Gelenkflächen (KKG) innerhalb der untersuchten Spezies zu finden, die Werte rangierten zwischen 1,94 cm<sup>2</sup> beim Hauskaninchen und 493 cm<sup>2</sup> beim Breitmaulnashorn. Zu beachten ist, dass das untersuchte Kniegelenk des Breitmaulnashorns nicht vom selben Tier stammte, wie das Ellbogengelenk, sondern von einem leichteren Tier (1200kg) (Tab.5.8. vs 5.1.). Die mittlere Gelenkknorpeldicke (MD) des gesamten Kniegelenks lag

bei den untersuchten Säugetieren zwischen 0,37 mm beim Kaninchen und 1,91 ( $\pm 0,31$ ) mm beim Menschen (Tab. 5.8.). Der Mensch zeigte im Vergleich zu den anderen untersuchten Spezies auch die größte maximale Knorpeldicke (5,6 mm  $\pm 0,96$ ) (Tab. 5.8.). Das Knorpelvolumen des gesamten Kniegelenkes wies die höchsten Werte beim Breitmaulnashorn (97833 mm<sup>3</sup>) und die niedrigsten beim Hauskaninchen (140 mm<sup>3</sup>) auf (Tab. 5.8.).

Es fand sich, wie beim Ellbogengelenk, eine signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Größe der KKG der untersuchten Tiere ( $r = 0,99$ ,  $p < 0,001$ ) (Abb. 5.7.). Die mittlere Knorpeldicke wies eine signifikant positive aber geringere Korrelation zum Körpergewicht auf ( $r = 0,57$ ,  $p < 0,05$ ) (Abb. 5.8.), wobei diese Korrelation und das Signifikanzniveau für die nicht-hominoiden Spezies höher war ( $r = 0,71$ ,  $p < 0,01$ ).

Für die mittlere Knorpeldicke des gesamten Kniegelenks konnte mit Einbeziehung des Menschen eine positive Korrelation zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke ( $r = 0,72$ ,  $p < 0,01$ ) aber keine Korrelation zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße beschrieben werden ( $r = 0,36$ ,  $p = 0,21$ ). Bei Berechnung dieser Korrelation mit der Lebenserwartung des Menschen vor 100 Jahren (47 statt 74 Jahren) ergab sich eine etwas geringere Korrelation, als mit der aktuellen Lebenserwartung ( $r = 0,67$ ,  $p < 0,01$ ). Ohne Einschluss des Menschen konnte sowohl zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke ( $r = 0,54$ ,  $p = 0,053$ ) (Abb. 5.9.), als auch zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße keine signifikante Korrelation beobachtet werden ( $r = 0,55$ ,  $p = 0,45$ ).

Bei den obligat bipeden Primaten (Mensch und Schimpanse) fanden wir sowohl ein kleineres Verhältnis von Körpergewicht zu Gelenkflächengröße als auch ein kleineres Verhältnis von Körpergewicht zu mittlerer Knorpeldicke als bei den übrigen Spezies. Das heißt, die Gelenkflächen sind bei diesen beiden Spezies in Relation zum

Körpergewicht größer und der Gelenkknorpel ist dicker als bei den übrigen Spezies (Tab 5.9.).

Spezies	Anzahl (n)	Gewicht (kg)	Lebenserwartung (J)*	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MW (mm)	Max (mm)
Breitmaulnashorn	1#	1200	40	493	515	97833	1,64	4,23
Hausrind	1	558	30	203	208	20922	1,12	3,64
Hauspferd	1	535	25	226	240	37922	1,36	4,62
Schwarzbär	1	120	12	53,6	583	6830	1,31	2,70
Hausschwein	1	111	20	74,3	826	9500	1,36	4,90
Mensch	142	71 ± 13	75 47**	92,3 ±13,4	102 ±16,5	22400 ±5870	1,91 ±0,31	5,60 ± 0,96
Schimpanse	3	31 ± 18	50	39,7 ± 9,29	43,0 ± 10,6	5091 ± 793	0,96 ± 0,28	3,20 ± 0,45
Haushund	5	26 ± 12	15	17,37 ± 6,86	18,5 ± 7,15	1578 ± 868	0,58 ± 0,30	1,68 ± 0,11
Pavian	1	23	20	14,1	22,3	2085	0,67	2,00
Biber	1	15	15	11,5	12,4	1287	0,68	1,46
Mandrill	1	7,5	20	8,72	7,41	648	0,62	1,46
Wildkatze	1	4,5	15	5,65	6,05	383	0,43	1,46
Hauskatze	2	4,1 ± 0,1	12	3,99 ± 0,73	4,19 ± 0,81	220 ± 61	0,34 ± 0,02	0,78 ± 0,07
Hauskaninchen	1	2,5	6	1,94	2,07	140	0,37	0,84

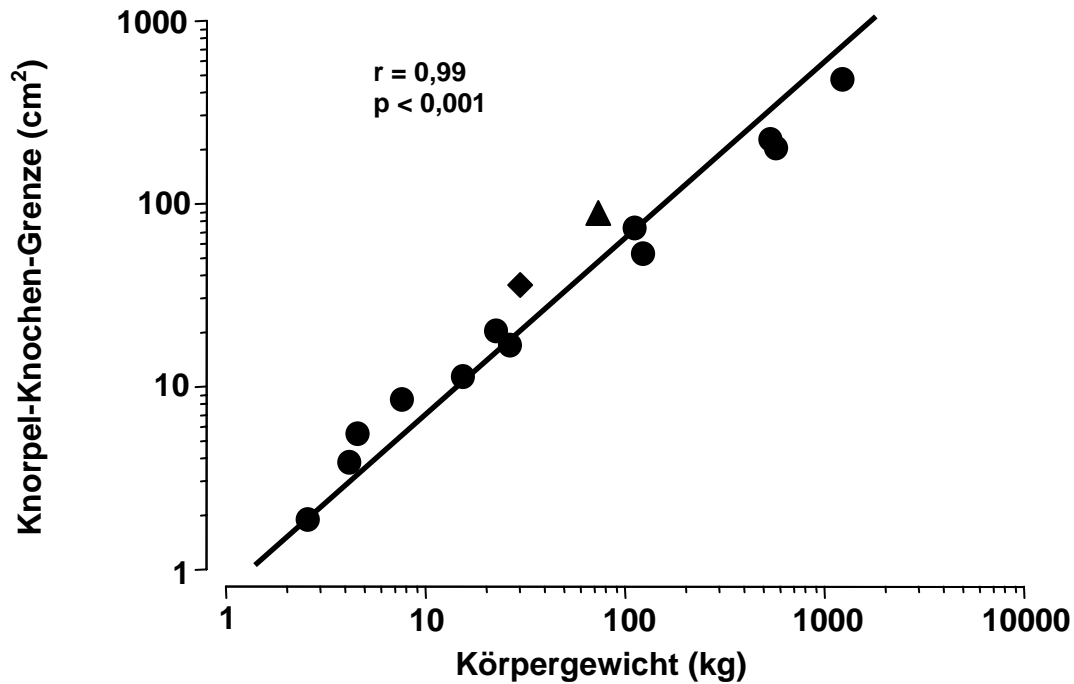
**Tab. 5.8. Ergebnisse Kniegelenk:**

Absolutwerte für Körpergewicht, Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol), und mittlere Knorpeldicke (MW) des gesamten Kniegelenks der untersuchten Spezies. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte gebildet. Diese Werte sind zusätzlich durch die Standardabweichungen beschrieben. Der Wert für die mittlere Knorpeldicke errechnet sich aus den gewichteten Werten der Einzelflächen (Eckstein et al. 2001a).

\*Bei den Werten für die Lebenserwartung handelt es sich um Angaben aus der Literatur (Grizmeck 1967).

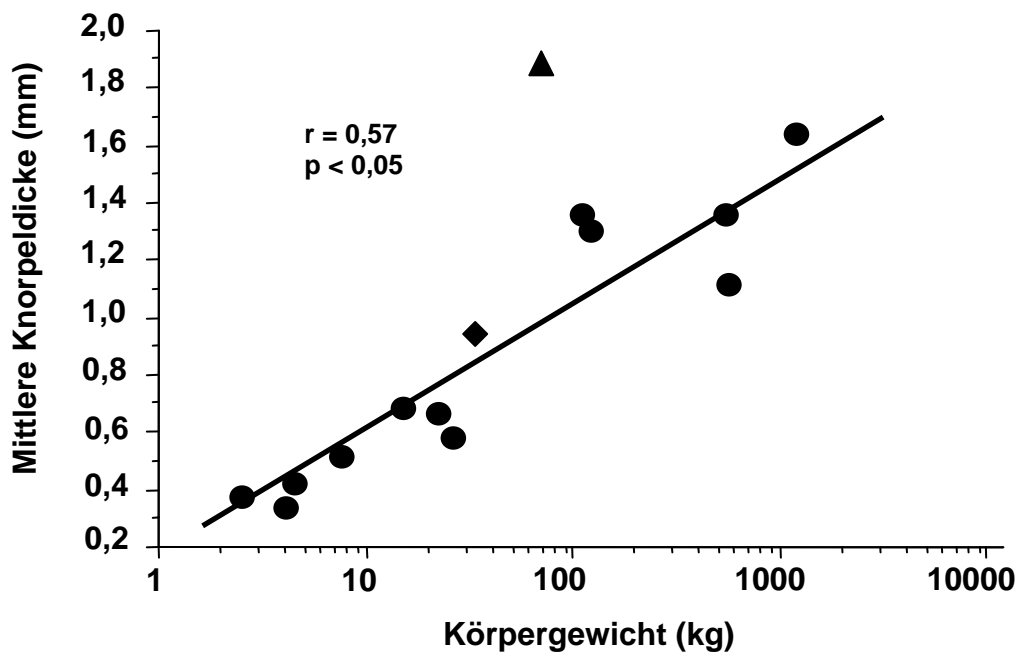
\*\*Lebenserwartung des Menschen vor 100 Jahren.

# Es handelt sich um ein anderes Tier, als bei der Untersuchung des Ellbogengelenks.



**Abb. 5.7. Gelenkfläche und Körpergewicht am Kniegelenk:**

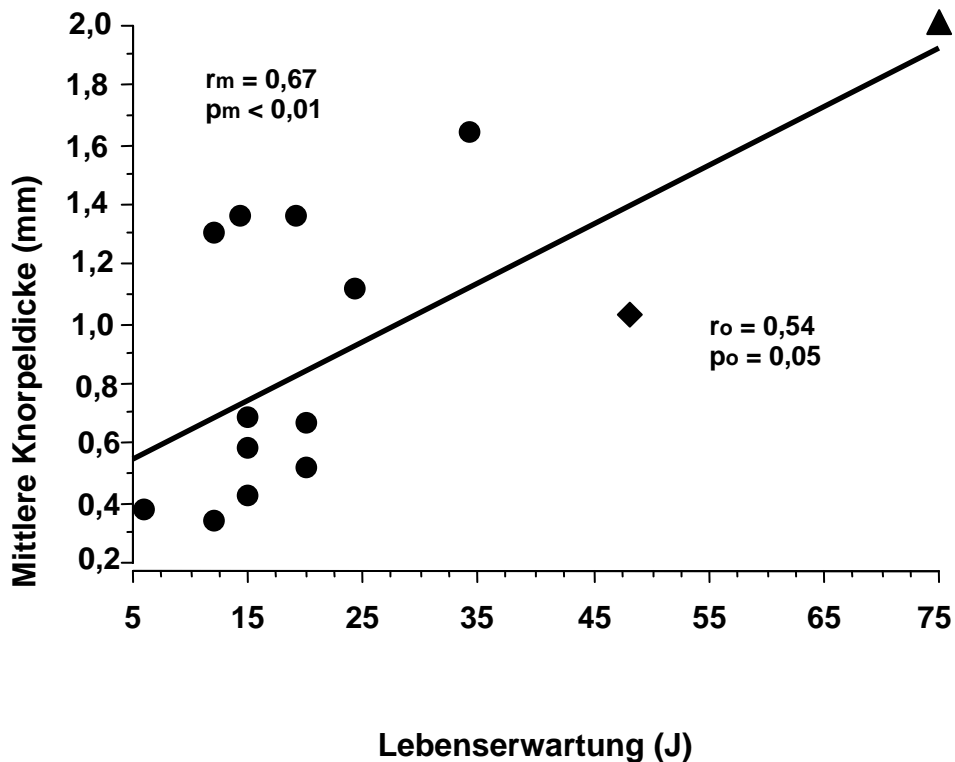
Das Verhältnis von der Größe der Knorpel-Knochen-Grenze (logarithmisch) zum Körpergewicht (logarithmisch) ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ▲, der Wert des Schimpansen durch ◆ gekennzeichnet.



**Abb. 5.8. Knorpeldicke und Körpergewicht am Kniegelenk:**

Das Verhältnis von mittlerer Gelenknorpeldicke (lineare Einheit) und Körpergewicht (logarithmische Einheit) ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ▲, der des Schimpansen durch ◆ dargestellt.





**Abb. 5.9. Knorpeldicke und Lebenserwartung am Kniegelenk:**  
 Das Verhältnis von mittlerer Gelenknorpeldicke (lineare Einheit) und Lebenserwartung (logarithmische Einheit) am gesamten Kniegelenk ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ▲, der des Schimpansen durch ◆ dargestellt.  $r_m$  bzw.  $p_m$  : mit Mensch,  $r_o$  bzw.  $p_o$  : ohne Mensch.

Spezies	Gangart	Körpergewicht/ Gelenkflächengröße kg / cm <sup>2</sup>	Körpergewicht/ Mittlere Knorpeldicke kg / mm
Nashorn	Quadruped	24,3	732
Husrind	Quadruped	27,4	498
Hauspferd	Quadruped	23,6	394
Schwarzbär	Fakultativ biped	22,4	91,7
Hausschwein	Quadruped	14,9	81,1
Mensch	Biped	7,6	36,8
Schimpanse	Fakultativ biped	7,1	38,5
Haushund	Quadruped	15,0	44,0
Pavian	Fakultativ biped	13,3	37,0
Biber	Fakultativ biped	13,1	22,0
Mandrill	Fakultativ biped	8,1	14,3
Wildkatze	Quadruped	8,0	10,5
Hauskatze	Quadruped	10,3	12,0
<b>Hauskaninchen</b>	<b>Fakultativ biped</b>	<b>12,9</b>	<b>6,69</b>

**Tab. 5.9. Verhältnisse Kniegelenk:**  
 Das Verhältnis von Körpergewicht und Gelenkflächengröße (kg / cm<sup>2</sup>) bzw. mittlerer Knorpeldicke (kg / mm) bei den bipeden, fakultativ bipeden und quadrupeden Säugetieren.

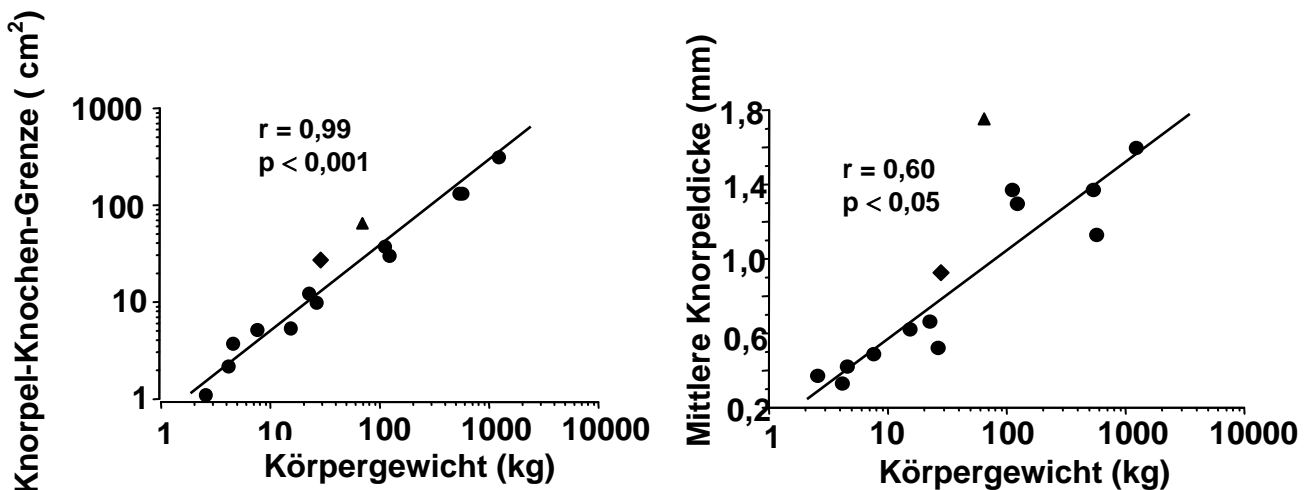
### 5.2.1. Femur

Für die Gelenkflächegrößen (KKG) am Femur ergaben sich Werte zwischen 1,1 cm<sup>2</sup> beim Hauskaninchen und 321 cm<sup>2</sup> beim Breitmaulnashorn (Tab. 5.10.). Der Mensch zeigte die größte mittlere Knorpeldicke (MD) (1,76 mm  $\pm$ 0,33) und die Wildkatze die geringste (0,42 mm) (Tab. 5.10.). Auch am Femur bestand eine hoch signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße ( $r = 0,99$ ,  $p < 0,001$ ) (Abb. 5.10.a). Es konnte eine signifikant positive, aber weniger hohe Korrelation zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke gefunden werden ( $r = 0,60$ ,  $p < 0,05$ ). Diese Korrelation und das Signifikanzniveau waren innerhalb der nicht-hominoiden Spezies höher ( $r = 0,75$ ,  $p < 0,01$ ) (Abb. 5.10.b). Am Femur zeigte sich eine moderat positive Korrelation zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke bei allen Spezies mit aktueller Lebenserwartung des Menschen ( $r = 0,63$ ,  $p < 0,05$ ), jedoch keine signifikante Korrelation mit der Lebenserwartung vor 100 Jahren ( $r = 0,49$ ,  $p = 0,24$ ) bzw. ohne den Menschen ( $r = 0,46$ ,  $p = 0,12$ ). Zwischen Gelenkflächengröße und aktueller Lebenserwartung beim Menschen ( $r = 0,36$ ,  $p = 0,21$ ) bzw. Lebenserwartung vor 100 Jahren ( $r = 0,42$ ,  $p = 0,24$ ), sowie ohne Einbeziehung des Menschen ( $r = 0,56$ ,  $p = 0,04$ ) zeigten sich keine positiven Korrelationen.

Spezies	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MW (mm)	Max (mm)
Breitmaulnashorn	321	340	58117	1,60	4,23
Hausrind	131	134	11722	1,13	3,64
Hauspferd	132	139	21270	1,37	4,62
Schwarzbär	30,4	33,6	3300	1,30	2,70
Hausschwein	37,8	41,7	3600	1,38	3,97
Mensch	56,7	63,3	13115	1,76	4,30
	± 8,17	± 9,73	± 3624	± 0,33	± 0,78
Schimpanse	23,4	25,9	3322	2,40	0,88
	± 5,43	± 6,06	± 553	± 0,45	± 0,06
Haushund	9,93	10,7	910	1,49	0,53
	± 4,81	± 5,04	± 548	± 0,27	± 0,08
Pavian	12,2	13,0	921	1,63	0,66
Biber	5,42	5,58	635	0,63	1,46
Mandrill	5,17	3,74	351	0,49	1,44
Wildkatze	3,81	4,15	250	0,42	1,46
Hauskatze	2,19	2,29	106	0,73	0,33
	± 0,56	± 0,59	± 44,6	± 0,00	± 0,02
Hauskaninchen	1,10	1,18	78,8	0,84	0,37

**Tab. 5.10. Ergebnisse Femorale Gelenkfläche:**

Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol), maximale Knorpeldicke (Max) und mittlere Knorpeldicke (MD) des femoralen Gelenkknorpels der untersuchten Spezies. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte und Standardabweichungen gebildet. Der Wert für die mittlere Knorpeldicke errechnet sich aus den gewichteten Werten der Einzelflächen.



**Abb. 5.10. a & b Graphen femorale Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von Knorpel-Knochen-Grenze (logarithmisch) bzw. mittlerer Knorpeldicke (linear) zum Körpergewicht am Femur ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ▲, der des Schimpansen durch ◆ gekennzeichnet.

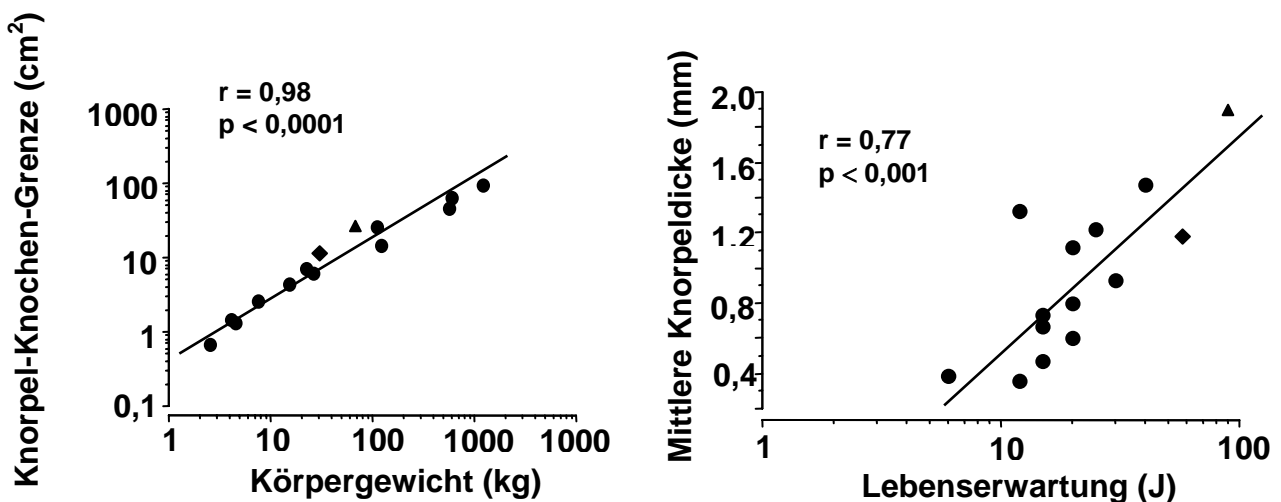
### 5.2.2. Tibia

An der Tibia fanden sich für die Gelenkfläche (KKG) Werte zwischen 0,70 cm<sup>2</sup> beim Kaninchen und 93,5 cm<sup>2</sup> beim Nashorn. Für die mittlere Dicke ergaben sich Werte zwischen 0,39 mm beim Kaninchen bis 1,9 mm ( $\pm 0,31$ ) beim Menschen (Tab. 5.11.). Der Mensch wies auch am tibialen Gelenkknorpel die größte mittlere (1,90 mm  $\pm$  0,31) und maximale Knorpeldicke (4,80 mm  $\pm$  0,96) auf (Tab. 5.11.). Auch an der Tibia bestand eine positive Korrelation zwischen dem Körpergewicht und der Gelenkflächengröße bei allen untersuchten ( $r = 0,98$ ,  $p < 0,0001$ ), sowie bei den nicht-hominoiden Spezies ( $r = 0,99$ ,  $p < 0,0001$ ) (Abb. 5.11.a). Zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke konnte unter Einbeziehung aller Spezies ( $r = 0,44$ ,  $p = 0,12$ ) keine signifikante Korrelation beschrieben werden. Innerhalb der nicht-hominoiden Spezies konnte ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke gezeigt werden ( $r = 0,52$ ,  $p < 0,05$ ) (Abb. 5.11.b). An der Tibia fand sich eine geringe positive Korrelation zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke ( $r = 0,77$ ,  $p < 0,001$ ) und keine zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße mit Mensch ( $r = 0,38$ ,  $p = 0,18$ ), wenn man von der aktuellen Lebenserwartung des Menschen ausgeht. Auch mit einer Lebenserwartung des Menschen vor 100 Jahren ergab sich zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke eine positive Korrelation ( $r = 0,64$ ,  $p = 0,05$ ) und keine zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße ( $r = 0,42$ ,  $p = 0,24$ ). Ohne Einbeziehung des Menschen fanden sich wesentlich geringere Korrelationen für Lebenserwartung und mittlere Knorpeldicke ( $r = 0,57$ ,  $p < 0,1$ ), bzw. Lebenserwartung und Gelenkflächengröße ( $r = 0,57$ ,  $p = 0,04$ ).

Spezies	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MW (mm)	Max (mm)
Breitmaulnashorn	93,5	95,7	19650	1,48	4,10
Hausrind	47,0	48,3	5200	0,93	3,60
Hauspferd	51,9	55,1	8628	1,22	3,88
Schwarzbär	14,9	15,8	2130	1,33	2,20
Hausschwein	25,7	27,9	3600	1,11	2,20
Mensch	23,2	25,0	5400	1,90	4,80
	±2,23	±2,44	±788	±0,31	±0,96
Schimpanse	11,9	12,4	1354	2,86	1,24
	±2,69	±3,83	±68,6	±0,46	±0,37
Haushund	6,13	6,49	555	1,53	0,67
	±1,79	±1,87	±253	±0,37	±0,16
Pavian	7,05	7,59	588	1,82	0,80
Biber	4,46	4,87	488	0,74	1,39
Mandrill	2,58	2,70	230	0,61	1,46
Wildkatze	1,37	1,43	104	0,47	1,02
Hauskatze	1,46	1,53	92,7	0,74	0,36
	±0,25	±0,28	±18,0	±0,14	±0,02
Hauskaninchen	0,70	0,74	50,9	0,39	0,66

**Tab. 5.11. Ergebnisse tibiale Gelenkfläche:**

Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol), maximale Knorpeldicke (Max) und mittlere Knorpeldicke (MW) der Tibia der untersuchten Spezies. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte und Standardabweichungen gebildet. Der Wert für die mittlere Knorpeldicke errechnet sich aus den gewichteten Werten der Einzelflächen (Eckstein et al. 2001a).



**Abb. 5.11. a & b Graphen tibiale Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von Knorpel-Knochen-Grenze (logarithmisch) und Körpergewicht (logarithmisch) bzw. mittlerer Knorpeldicke (linear) und Lebenserwartung (logarithmisch) an der Tibia ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ▲, der des Schimpansen durch ◆ gekennzeichnet.

### 5.2.3. Patella

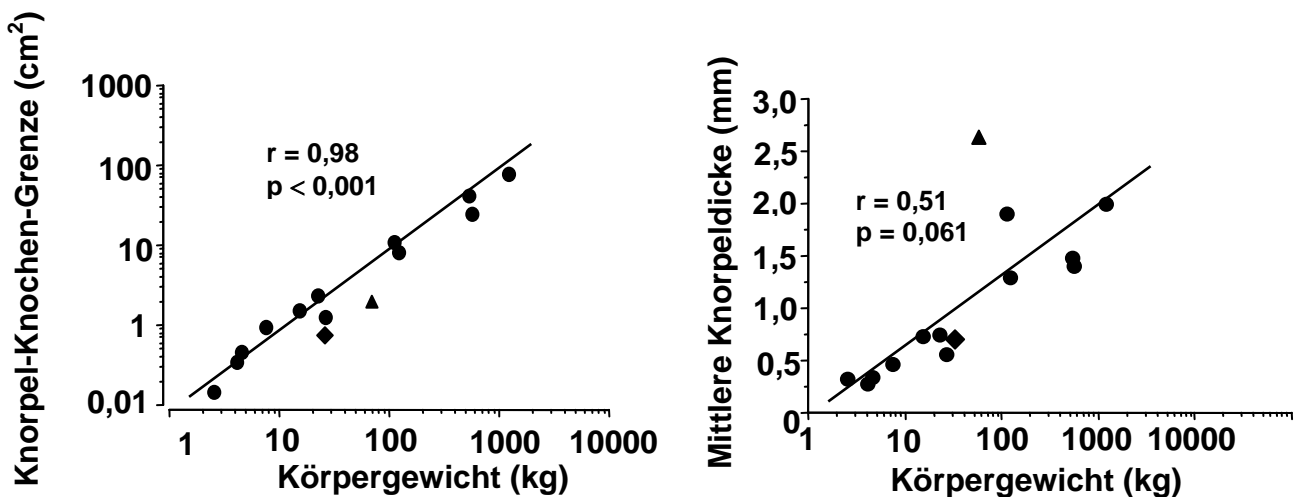
Für den patellaren Gelenkknorpel wurde für die Gelenkfläche (KKG) Werte zwischen 0,14 cm<sup>2</sup> (Kaninchen) und 78,1 cm<sup>2</sup> (Nashorn) beobachtet (Tab. 5.12.). Die mittlere Knorpeldicke betrug Werte zwischen 0,33 mm ( $\pm 0,01$ ) beim Kaninchen und 2,7 mm ( $\pm 0,45$ ) beim Menschen (Tab. 5.12.). Mit 5,6 mm ( $\pm 1,02$ ) wurde an der Patella die dickste maximale Knorpeldicke (Tab. 5.12.), gefunden.

Auch an der Patella ergab sich eine signifikant positive Korrelation zwischen dem Körpergewicht und der Gelenkflächengröße ( $r = 0,98$ ,  $p < 0,001$ ). Eine positive aber nicht signifikante Korrelation wurde zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke ( $r = 0,51$ ,  $p = 0,061$ ) beobachtet (Abb. 5.12.a), wohingegen zwischen den nicht-hominoiden Spezies eine signifikant positive Korrelation gefunden wurde ( $r = 0,74$ ,  $p < 0,01$ ) (Abb. 5.12.b). Es konnte eine gering positive Korrelation zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke bei allen Spezies mit der aktuellen Lebenserwartung des Menschen ( $r = 0,68$ ,  $p < 0,01$ ) aber keine mit der Lebenserwartung des Menschen vor 100 Jahren ( $r = 0,48$ ,  $p = 0,17$ ), sowie ohne Einbeziehung des Menschen ( $r = 0,39$ ,  $p = 0,20$ ) gefunden werden. Zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße konnte sowohl mit aktueller Lebenserwartung des Menschen ( $r = 0,33$ ,  $p = 0,26$ ), mit der Lebenserwartung des Menschen vor 100 Jahren ( $r = 0,38$ ,  $p = 0,29$ ), als auch ohne Mensch ( $r = 0,53$ ,  $p < 0,07$ ) keine signifikanten Korrelationen beschrieben werden.

Spezies	KKG (cm <sup>2</sup> )	GF (cm <sup>2</sup> )	Vol (mm <sup>3</sup> )	MW (mm)	Max (mm)
Breitmaulnashorn	78,1	79,3	20066	2,00	3,70
Hausrind	24,9	25,5	4000	1,40	2,40
Hauspferd	42,4	45,2	8023	1,49	2,90
Schwarzbär	8,30	8,90	1400	1,30	2,60
Hausschwein	10,8	13,0	2300	1,90	4,90
Mensch	12,7	14,0	3900	2,70	5,60
	±2,03	±2,13	±970	±0,45	±1,02
Schimpanse	4,48	4,65	415	1,39	0,70
	±1,94	±2,00	±283	±0,25	±0,32
Haushund	1,30	1,32	113	0,84	0,57
	±0,69	±0,70	±81,9	±0,18	±0,17
Pavian	2,40	2,42	246	1,61	0,74
Biber	1,57	1,64	164	0,73	1,14
Mandrill	0,97	0,96	67,1	0,46	1,02
Wildkatze	0,47	0,47	28,4	0,35	0,57
Hauskatze	0,34	0,36	20,7	0,49	0,27
	±0,07	±0,06	±2,33	±0,12	±0,01
Hauskaninchen	0,14	0,15	10,3	0,33	0,48

**Tab. 5.12. Ergebnisse patellare Gelenkfläche:**

Knorpel-Knochen-Grenze (KKG), Gelenkfläche (GF), Knorpelvolumen (Vol), maximale Knorpeldicke (Max) und mittlere Knorpeldicke (MW) der Tibia. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte Standardabweichungen gebildet. Der Wert für die mittlere Knorpeldicke errechnet sich aus den gewichteten Werten der Einzelflächen (Eckstein et al. 2001a).



**Abb. 5.12. a & b Graphen patellare Gelenkfläche:**

Das Verhältnis von Knorpel-Knochen-Grenze (logarithmisch) bzw. mittlerer Knorpeldicke (linear) zum Körpergewicht an der Patella ist durch die Regressionsgerade dargestellt. Der Wert des Menschen ist durch ein Dreieck, der des Schimpansen durch eine Raute gekennzeichnet.

#### 5.2.4. Prozentuale Verteilung der Gelenkfläche an den Einzelflächen

Für die prozentuale Verteilung der Knorpel-Knochen-Grenzen an den Einzelflächen des Kniegelenks wies bei allen untersuchten Spezies der femorale Gelenkknorpel den größten Flächenanteil auf. Die Werte rangierten zwischen 47% beim Biber und 67% bei der Wildkatze. Bei den obligat bzw. fakultativ bipeden Spezies betrug der Anteil des Femur 47% - 61%, bei den quadrupeden Spezies 51% - 67%. Den zweitgrößten Flächenanteil nahm bei allen Spezies die Tibia ein (zwischen 19% beim Breitmaulnashorn und 39% beim Biber, obligat bzw. fakultativ bipede Spezies 25% - 39%, quadrupede Spezies 19% - 36%). Der patellare Gelenkknorpel zeigte bei allen Spezies den geringsten Anteil an der Gesamtknorpelfläche (zwischen 7% beim Kaninchen und 19% beim Pferd, obligat bzw. fakultativ bipede Spezies 9% - 15%, quadrupede Spezies 8% - 19%) (Tab. 5.13.).

Spezies	Körpergewicht (kg)	Gangart	Femur %	Tibia %	Patella %
Mensch	71 ± 13	biped	61	25	14
Schwarzbär	120	fakultativ biped	57	28	15
Schimpanse	31 ± 18	fakultativ biped	55	36	9
Pavian	23	fakultativ biped	60	29	11
Biber	15	fakultativ biped	47	39	14
Mandrill	7,5	fakultativ biped	59	30	11
Breitmaulnashorn	1200	quadruped	65	19	16
Hausrind	558	quadruped	65	23	12
Hauspferd	535	quadruped	58	23	19
Hausschwein	111	quadruped	51	35	14
Haushund	26 ± 12	quadruped	57	35	8
Wildkatze	4,5	quadruped	67	24	9
Hauskatze	4,1 ± 0,1	quadruped	55	37	8
Hauskaninchen	2,5	quadruped	57	36	7

**Tab. 5.13. Prozentuale Verteilung der Gelenkflächengröße am Kniegelenk:**  
Die prozentuale Verteilung der Gelenkflächen der Einzelflächen des Kniegelenks in %.



### 5.2.5. Mittlere Gelenknorpeldicke an den Einzelflächen

Bei Breitmaulnashorn, Rind, Pferd, Schwein und Mensch zeigten sich an der Patella die größten absoluten mittleren Knorpeldicken. Bei Schwarzbär, Schimpansen, Hund, Pavian, Biber, Mandrill, Wildkatze, Katze und Kaninchen wurden an der Tibia die größten Werte für die mittlere Knorpeldicke gefunden (Tab. 5.14.). Bei allen untersuchten fakultativ bipeden Spezies konnte die dickste mittlere Knorpeldicke an der Tibia beschrieben werden, wohingegen beim obligat bipeden Menschen die Patella die dickste mittlere Knorpeldicke aufwies.

Spezies	Körpergewicht (kg)	Gangart	Femur (mm)	%	Tibia (mm)	%	Patella (mm)	%	MD 100%
Mensch	71 ± 13	biped	1,75	91,3	1,90	99,0	2,70	141	1,92
Schwarzbär	120	fakultativ biped	1,30	99,4	1,33	102	1,30	99,4	1,31
Schimpanse	31 ± 18	fakultativ biped	0,77	79,6	1,02	106	0,57	59,1	
Pavian	23	fakultativ biped	0,66	98,9	0,80	120	0,74	111	0,67
Biber	15	fakultativ biped	0,63	91,7	0,74	108	0,73	107	0,68
Mandrill	7,5	fakultativ biped	0,49	93,8	0,61	117	0,46	89,2	0,52
Breitmaulnashorn	1200	quadruped	1,60	97,6	1,48	90,2	2,00	122	1,64
Hausrind	558	quadruped	1,13	102	0,93	83,2	1,40	125	1,12
Hauspferd	535	quadruped	1,37	101	1,22	89,8	1,49	109	1,36
Hausschwein	111	quadruped	1,38	101	1,11	81,8	1,90	139	1,36
Haushund	26 ± 12	quadruped	0,53	91,9	0,67	115	0,57	97,4	0,58
Wildkatze	4,5	quadruped	0,32	102	0,47	104	0,35	77,3	0,45
Hauskatze	4,1 ± 0,1	quadruped	0,33	97,9	0,36	107	0,27	81,1	0,34
Hauskaninchen	2,5	quadruped	0,37	99,4	0,39	103	0,33	76,3	0,37

**Tab. 5.14. Mittlere Knorpeldicke an den Einzelflächen des Kniegelenkes:**

Die Verteilung der mittleren Knorpeldicke an den Einzelflächen des Kniegelenks in mm und %. Die jeweils größten Werte für die mittlere Knorpeldicke sind „schräg“ geschrieben.

### 5.3. Vergleichende Ergebnisse von Ellbogen-, und Kniegelenk

Bei den Individuen, bei welchen Knie- und Ellbogengelenke zur Untersuchung zur Verfügung standen, war bei den meisten untersuchten Säugetierarten am Kniegelenk

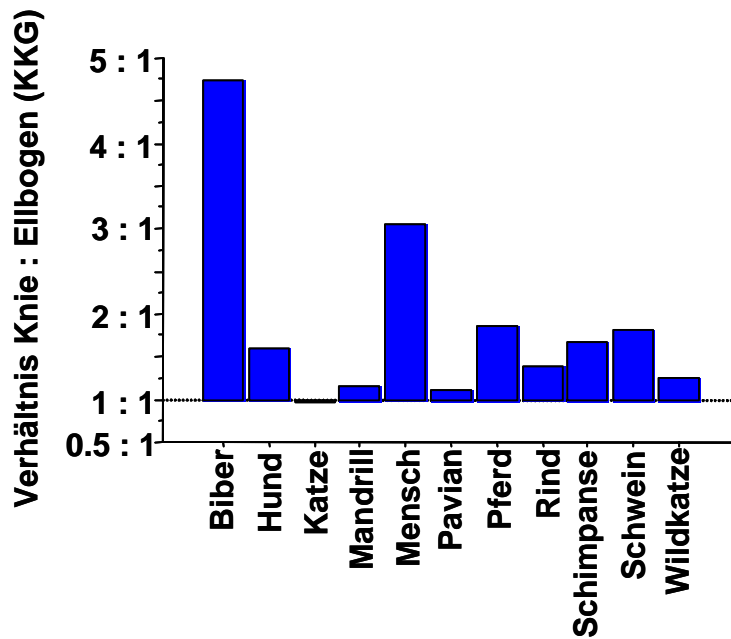
eine größere Gelenkfläche (außer beim Mandrill) und auch eine größere mittlere Knorpeldicke (außer bei Schimpanse, Haushund und Wildkatze) zu finden (Tab. 5.15.m, Abb. 5.13. a & b). Beim obligat bipeden Biber wurde der größte Unterschied zwischen den Gelenkflächen von Knie- und Ellbogengelenk gefunden (Verhältnis Kniegelenk : Ellbogengelenk = 1 : 0,21). Bei Mandrill zeigten sich etwa gleich große Gelenkflächen an Ellbogen-, und an Kniegelenk (Verhältnis Kniegelenk : Ellbogengelenk = 1 : 1,02). Für die mittlere Knorpeldicke wurden die größten Unterschiede zwischen Ellbogen-, und Kniegelenk beim Pferd gefunden (Verhältnis Kniegelenk : Ellbogengelenk = 1 : 0,25). Bei Schimpanse (1 : 1,16), Haushund (1 : 1,07) und Wildkatze (1 : 1,58) konnten am Ellbogengelenk ein dickerer Gelenkknorpel, als am Kniegelenk beschrieben werden. Beim Menschen ergaben sich Verhältnisse von 1 : 0,33 bzw. 1 : 0,47 für die Knorpel-Knochen-Grenze und 1 : 0,26 bzw. 1 : 0,28 für die mittlere Knorpeldicke.

Spezies	Körpergewicht (kg)	Ellbogengelenk		Kniegelenk		Verhältnis Knie : Ellbogen KKG	Verhältnis Knie : Ellbogen MW
		KKG (cm <sup>2</sup> )	MW (mm)	KKG (cm <sup>2</sup> )	MW (mm)		
Hausrind	558	147	1,07	203	3,64	1 : 0,72	1 : 0,29
Hauspferd	535	121	1,14	226	4,62	1 : 0,54	1 : 0,25
Hausschwein	111	40,9	0,87	74,3	2,70	1 : 0,55	1 : 0,32
Mensch <sup>1*</sup>	74 ±7,8	30,3 ±4,4	1,12 ±0,12	92,3 ±13,4	4,30 ±0,31	1 : 0,33	1 : 0,26
Mensch <sup>2*</sup>	84 ±18	43,13	1,22 ±0,09	92,3 ±13,4	4,30 ±0,31	1 : 0,47	1 : 0,28
Schimpanse	31 ±17,9	23,9 ±4,98	1,02 ±0,05	39,7 ± 9,29	0,88 ±0,06	1 : 0,60	1 : 1,16
Haushund	24 ±12,3	10,9 ±5,65	0,63 ±0,09	17,4 ± 6,86	0,59 ±0,09	1 : 0,63	1 : 1,07
Pavian	23	12,6	0,72	14,1	2,00	1 : 0,89	1 : 0,36
Biber	15	2,43	0,64	11,5	0,68	1 : 0,21	1 : 0,94
Mandrill	7,5	8,91	0,61	8,72	0,62	1 : 1,02	1 : 0,98
Wildkatze	4,5	2,90	0,68	5,65	0,43	1 : 0,51	1 : 1,58
Hauskatze	4,1 ±0,07	2,70 ±1,03	0,53 ±0,19	3,99 ± 0,73	0,78 ± 0,07	1 : 0,68	1 : 0,68

**Tab. 5.15. Vergleiche von Ellbogen und Kniegelenk:**

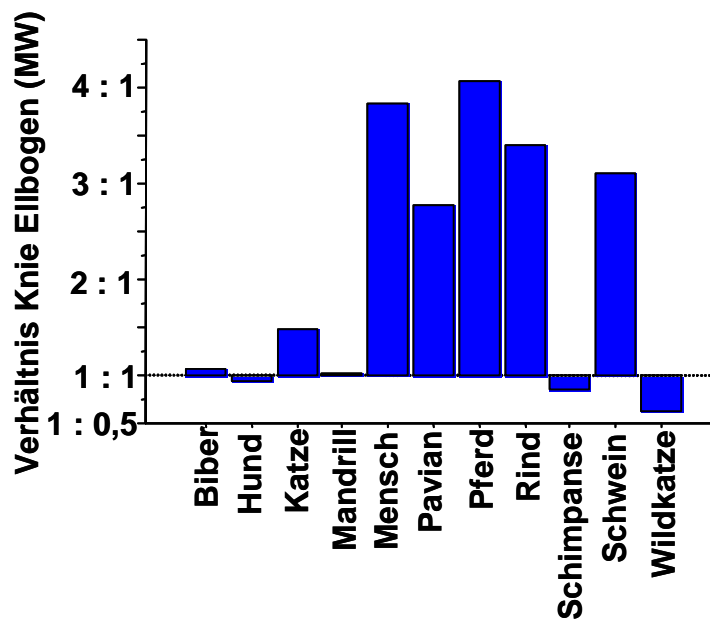
Knorpel-Knochen-Grenze (KKG) und mittlere Knorpeldicke (MW) des gesamten Ellbogen-, und Kniegelenks und die Verhältnisse dieser Werte zueinander. Bei mehreren untersuchten Exemplaren einer Spezies wurden Mittelwerte und Standardabweichung gebildet.

\*Beim Menschen wurden zwei verschiedene Kollektive verwendet, siehe Kap 4.1. Bei Mensch<sup>1</sup> am Ellbogen handelt es sich um die Mittelwerte zweier Individuen, bei Mensch<sup>2</sup> um Daten aus einer früheren Studie (Springer et al. 1998).



**Abb. 5.13.a Verhältnis der KKG zwischen Kniegelenk und Ellbogengelenk:**

Die Verhältnisse der Gelenkflächen (KKG) von Kniegelenk und Ellbogengelenk. Die untersuchten Spezies sind in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.



**Abb. 5.13.b Verhältnis der mittleren Knorpeldicke zwischen Kniegelenk und Ellbogengelenk:**

Die Verhältnisse der mittleren Knorpeldicke (MD) von Kniegelenk und Ellbogengelenk. Die untersuchten Spezies sind in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

## 6. Diskussion

Die vorliegende Studie wurde konzipiert, um folgende Fragestellungen zu untersuchen:

- 1) Gibt es Zusammenhänge zwischen der Größe der Knorpel-Knochen-Grenze und der Knorpeldicke des Ellbogen-, und Kniegelenks und den Parametern Körpergewicht, Lebenserwartung und Gangart einer Spezies?
- 2) Besteht ein Zusammenhang zwischen der prozentualen Verteilung Knorpel-Knochen-Grenzen oder der Verteilung von mittlerer Knorpeldicke an den Einzelflächen der Gelenke und den Parametern Körpergewicht und Gangart (quadruped, fakultativ biped, obligat biped) der untersuchten Spezies?
- 3) Wie verhalten sich Größe der Knorpel-Knochen-Grenze und Knorpeldicke zwischen Ellbogen-, und Kniegelenk einer Spezies?

In Bezug auf diese Fragen können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

### *Fragestellung 1:*

Es konnte bei allen Spezies, sowohl am Ellbogen-, als auch am Kniegelenk, eine hohe und signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße gefunden werden. Allerdings konnte an beiden Gelenken nur eine geringe bis moderate, signifikant positive Korrelation zwischen dem Körpergewicht und der mittleren Knorpeldicke beschrieben werden. Am Ellbogengelenk wurde eine Korrelation zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke gefunden, die am Kniegelenk nicht beobachtet wurde. Zwischen Lebenserwartung und Gelenkflächengröße konnte an beiden Gelenken keine signifikante Korrelation beschrieben werden. Bei den obligat bipeden Primaten (Mensch und Schimpanse) fanden wir, in Relation zum Körpergewicht, an Ellbogen- und Kniegelenk größere Gelenkflächen und ein dickerer Gelenkknorpel, als bei den quadrupeden Spezies. Beim obligat bipeden Biber wurde, in

Relation zum Körpergewicht, am Ellbogengelenk eine kleinere Gelenkfläche, als bei den anderen Spezies gefunden.

*Fragestellung 2:*

Bei allen untersuchten Spezies konnten sowohl am Ellbogen-, (Humerus > Radius > Ulna) als auch am Kniegelenk, (Femur > Tibia > Patella) ähnliche Verteilungen der Gelenkflächengrößen gezeigt werden, die nicht von den Parametern Körpergewicht oder Gangart bestimmt werden zu scheinen.

*Fragestellung 3:*

Die Gelenkfläche war bei allen Spezies (inklusive dem Menschen), außer dem Mandrill, am Kniegelenk größer, als am Ellbogengelenk. Die mittlere Knorpeldicke war bei allen Spezies (inklusive dem Menschen), außer bei Schimpanse, Haushund und Wildkatze am Kniegelenk größer, als am Ellbogengelenk.

### **6.1. Methodikdiskussion**

Für diese Studie wurde ein breites Spektrum an Säugetierarten mit unterschiedlichen Gangarten (biped, fakultativ biped, quadruped) ausgewählt. Von den meisten Spezies wurde je ein, von einigen Spezies wurden mehrere Exemplare untersucht. Zusätzlich wurden Tierarten mit unterschiedlichen Gangarten (biped, fakultativ biped, quadruped) ausgewählt. Auf das Alter und das Geschlecht der Tiere wurde keine Rücksicht genommen, allerdings waren alle Tiere ausgewachsen. Da es sich um einen Inter-Spezies Vergleich handelt und die verschiedenen Säugetiere zum Teil große Unterschiede in ihrer Körpermorphologie aufweisen, gehen wir davon aus, dass auch mit einer geringen Stückzahl einzelner Spezies repräsentative Aussagen gemacht werden können.

Bisherige vergleichende Untersuchungen des Gelenkknorpels von Säugetieren wurden mit der Licht-, oder Elektronenmikroskopie durchgeführt. (Simon 1970;

Stockwell 1971; Kaab et al. 1998). Mit diesen Methoden ist es allerdings lediglich möglich den Gelenkknorpel lokal zu beurteilen und nicht gesamte Knorpelplatten zu vermessen (Karvonen et al. 1994; Dalla Palma et al. 1997; Eckstein et al. 2001a). Die Betrachtung der gesamten Knorpelplatten ist jedoch von großer Bedeutung, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass einzelne untersuchte Lokalisationen repräsentativ für den gesamten Knorpel sind (Pandy et al. 1988a; Pandy et al. 1988b; Carlson-Kuhta et al. 1998). Andere gängige Methoden zur Beschreibung des Gelenkknorpels wie die Messung durch Wasserverdrängung (Peterfy et al. 1994a; Piplani et al. 1996b; Burgkart et al. 2001), anatomische Schnitte (Eckstein et al. 1996b; Eckstein et al. 1997a), A-Mode Ultraschall (Eckstein et al. 1997b; Graichen et al. 2000), CT-Arthographie (Eckstein et al. 1997b; Eckstein et al. 1998b; Graichen et al. 2000) oder Stereophotometrie (Cohen et al. 1999) haben den Nachteil, dass sie invasiv sind und in der Regel nicht die Erhebung aller relevanten Parameter, wie Knorpelvolumen, Gelenkflächengröße und Knorpeldicke ermöglichen.

Die Magnetresonanztomographie und die anschließende digitale Bildverarbeitung stellt dagegen eine validierte Methode zur Visualisierung und morphologischen Analyse des kompletten Gelenkknorpels des menschlichen Knie-, und Ellbogengelenks (Springer et al. 1998; Eckstein et al. 2001a; Eckstein et al. 2004) dar. Bei Untersuchungen anderen Säugetieren wie Primaten (Gahunia et al. 1993; Gahunia et al. 1995), Rind (Lehner et al. 1989; Marshall et al. 1995a; Marshall et al. 1995b; Piplani et al. 1996b), Pferd (Martinelli et al. 1996; Widmer et al. 1999; Blaik et al. 2000), Schwein (Robinson et al. 1988; Tebben et al. 1997), Miniaturschwein (Koh et al. 1996), Hund (Adam et al. 1994; Baird et al. 1998; Widmer et al. 1999), Kaninchen (Link et al. 1997a; Link et al. 1998), Meerschweinchen (Watson et al. 1997) und Ratte (Carpenter et al. 1994; Loeuille et al. 1997) konnten gezeigt werden, dass auch bei diesen Tieren der Gelenkknorpel mit der MRT hochauflösend dargestellt werden kann.

Anhand von Vergleichen mit invasiven Messmethoden konnte gezeigt werden, dass sich beim Menschen Gelenkknorpeldicke und Gelenkknorpelvolumen mit Hilfe von 1,5 T MRT-Geräten und T1 gewichteten, fettunterdrückten Gradienten-Echo Sequenzen mit einem hohen Maß an Validität und Reproduzierbarkeit messen lassen (Peterfy et al. 1994b; Piplani et al. 1996b; Eckstein et al. 1996b; Eckstein et al. 1998a; Cohen et al. 1999; Burgkart et al. 2001; Eckstein et al. 2001a; Eckstein et al. 2001b) darstellen lassen. Mit diesem Sequenztyp lässt sich Gelenkknorpel gut gegenüber dem subchondralem Knochen, der Synovialflüssigkeit und den Meniski abgrenzen. Diese Untersuchungen umfassten menschliche Extremitätengelenke verschiedener Größen, wie das Kniegelenk (Eckstein et al. 2001a), das Ellbogengelenk (Graichen et al. 2000; Graichen et al. 2004) und das Metacarpalgelenk (Peterfy et al. 1995). Auch bei Rindern (Marshall et al. 1995b; Piplani et al. 1996a), Schweinen (Tebben et al. 1997), Hunden (Adam et al. 1994) und Kaninchen (Link et al. 1997b; Link et al. 1998) erwiesen sich bei 1,5 T fettunterdrückte Gradienten-Echo-Sequenzen für die präzise Darstellung des Gelenkknorpels als geeignet.

Für das Kniegelenk beim Menschen wurden bei 1,5 Tesla Präzisionsfehler von 2,3% für die Knorpeldicke und 1,6% für die Gelenkfläche beschrieben (Eckstein et al. 2002; Eckstein et al. 2004; Eckstein et al. 2006a; Eckstein et al. 2006b). Um den Unterschieden der Gelenkgrößen der untersuchten Tiere gerecht zu werden, wurde, je nach Größe der zu untersuchenden Extremität, Auflösungen von 0,2 mm bis 0,59 mm und Schichtdicken zwischen 1 mm und 2,34 mm verwendet. Die sagittale Schnittführung erwies sich als geeignete Methode, um alle Gelenkflächen des Knie- und des Ellbogengelenks von einem Datensatz darzustellen (Eckstein et al. 1996a). Durch eine anschließende dreidimensionale Rekonstruktion der Knorpelplatten können unterschiedliche Schnittführung oder Angulierung vernachlässigt werden (Peterfy et al. 1994a; Eckstein et al. 1996a).

Zur Segmentierung und Analyse des Gelenkknorpels wurde eine dreidimensionale Bildverarbeitungssoftware eingesetzt (Stammberger et al. 1999a; Stammberger et al. 1999b; Hohe et al. 2000). Mit dieser Software wird der Knorpel zunächst dreidimensional rekonstruiert und die Knorpeldicke anschließend berechnet (Stammberger et al. 1999a). Da MRT Bilder keinen ausreichenden Kontrast zur vollautomatischen Segmentierung des Gelenkknorpels liefern, wurde der Knorpel mit einem „B-Spline Snake“ Algorithmus semiautomatisch unter visueller Kontrolle segmentiert (Stammberger et al. 1999b). Dieser Algorithmus neigt in Randgebieten und Kontaktzonen des Gelenkknorpels zu Ungenauigkeiten, deshalb mussten hier manuelle Korrekturen durchgeführt werden.

## **6.2. Ergebnisdiskussion und Interpretation**

### **6.2.1. Gelenkknorpelmorphologie und Körpergewicht**

Für die Gesamtflächen und die Einzelflächen des Gelenkknorpels von Ellbogen- und Kniegelenksgelenk konnte gezeigt werden, dass bei den untersuchten Spezies eine hohe, signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße besteht. Zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke von Knie-, und Ellbogengelenk ergab sich eine deutlich geringere Korrelation. Das Verhältnis von Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke zeigte innerhalb der nicht-hominoiden Spezies (ohne Mensch und Schimpansen), sowohl am Knie, als auch am Ellbogengelenk eine höhere Korrelation, als mit Einbeziehung von Mensch und Schimpansen.

In früheren Studien mit verschiedenen Säugetieren wurde ein positiver Zusammenhang zwischen Knorpeldicke und Körpergewicht beschrieben (Simon 1970; Stockwell 1971). In der Studie von Stockwell wurde die Knorpeldicke an einer determinierten Lokalisation der Femurkondylen durch Entnahme eines Knorpelspans



---

von vier Säugetierspezies (Mensch, Rind, Pferd, Kaninchen) elektronenmikroskopisch untersucht. Es zeigte sich ein positiver Zusammenhang zwischen Knorpeldicke und Körpergewicht der Spezies. In der Studie von Simon wurde der Gelenkknorpel der Femurkondylen, des Tibiaplateaus, der Patella und des distalen Humerus von fünf Säugetierspezies untersucht (Simon 1970). Bei den größeren Tierarten (Rind, Schaf, Hund) wurde ein sagittaler, 3 mm breiter Knorpelspan, ebenfalls an einer definierten Lokalisation, entnommen, entkalkifiziert und anschließend fotografiert. Bei den kleineren Tierarten (Ratte, Maus) wurde der Gelenkknorpel mikroskopisch beurteilt. Er beschrieb den Zusammenhang von Knorpeldicke und Körpergewicht durch eine Regressionsanalyse, in der sich, wie in der vorliegenden Studie und der Studie von Stockwell ein nur schwacher Zusammenhang ergab. Es zeigte sich ein deutlicher ausgeprägter Zusammenhang zwischen Knorpeldicke und Körpergröße (Hüfte-Schulter-Länge) der untersuchten Spezies. Wir konnten in der vorliegenden Studie den Zusammenhang zwischen Hüft-Schulter-Länge und Knorpeldicke beziehungsweise Gelenkflächengröße nicht statistisch untersuchen, da nicht mehr Angaben zur Körpergröße der untersuchten Spezies zur Verfügung standen und die Abschätzung mit Angaben aus der Literatur zu fehleranfällig gewesen wäre. Da in den Studien von Simon und Stockwell Methoden angewandt wurden, die den Gelenkknorpel lediglich an einzelnen Lokalisationen beurteilen, konnten in diesen Studien keine Aussagen über gesamte Knorpelplatten gemacht werden und damit sind die Ergebnisse, im Vergleich zur vorliegenden Studie, mit Vorsicht zu interpretieren.

Insgesamt weisen diese Studien, wie auch die vorliegende Studie, darauf hin, dass Gelenkflächengrößen und in wesentlich geringerem Ausmaß auch Knorpeldicke des Knie-, und des Ellbogengelenks in einem positiven Zusammenhang zum Körpergewicht stehen. Im Laufe der Evolution könnte eine Anpassung des Gelenkknorpels an das steigende Körpergewicht und der damit verbundenen

mechanischen Belastungen stattgefunden haben, die weniger über eine Dickenanpassung des Gelenkknorpels, sondern vor allem durch eine Anpassung der Gelenkflächen erfolgt ist. Dies lässt sich auch physikalisch mit der Formel  $\text{Druck} = \text{Kraft} / \text{Fläche}$  ( $p = F / A$ ) erklären, wenn man davon ausgeht, dass das Körpergewicht eines Landsäugers sich proportional zu der Kraft, die auf die Gelenke wirkt verhält. Somit würde eine Anpassung an eine steigende Krafteinwirkung über eine Anpassung der Flächengröße erfolgen, um einen vergleichbaren Druck zu gewährleisten. Wahrscheinlich existiert eine biologische Belastungsgrenze des Gelenkknorpels, bezüglich des einwirkenden Druckes, der einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten darf. Aufgrund der an den Gesamt-, und an den Einzelflächen von Ellbogen-, und Kniegelenk durchgehend hohen Signifikanz scheint das Körpergewicht ein wichtiger Einflussfaktor für die Größe der Gelenkfläche zu sein.

Eine Anpassung der Knorpeldicke an das Körpergewicht hat in der evolutionären Entwicklung offensichtlich nicht stattgefunden, ein Grund hierfür könnte sein, dass sich mit der Zunahme der Knorpeldicke die mechanische Kompetenz des Knorpels nicht verbessert, und wichtige funktionelle Eigenschaften des Gewebes, wie die hydrostatische Kompression, nicht mehr gewährleistet werden können (Ateshian et al. 1994; Ateshian et al. 1995).

Die stärker ausgeprägten Korrelationen zwischen Körpergewicht und Gelenkflächengröße innerhalb der nicht-hominoiden Spezies, im Vergleich zu den entsprechenden Korrelationen unter Einbeziehung von Mensch Schimpansen, weisen eventuell darauf hin, dass bei den hominoiden Säugetieren veränderte Einflüsse auf die Morphologie des Knorpels bestehen könnten. Hier könnten der bipede Gang und die taktile Verwendung der vorderen Extremität eine Rolle spielen.

### **6.2.2. Gelenkknorpel und Lebenserwartung**

Die mittleren Knorpeldicken am Ellbogengelenk zeigen einen signifikant positiven Zusammenhang mit der durchschnittlichen Lebenserwartung einer Spezies. Diese Korrelationen waren in der Regel höher als die zwischen Körpergewicht und mittlerer Knorpeldicke am Ellbogen. Ohne Einbeziehung des Menschen waren die Korrelation und das Signifikanzniveau von Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke am Ellbogengelenk höher, als unter Einbeziehung. Es konnte auch eine höhere Korrelation bei Berechnung dieser Korrelation mit der Lebenserwartung des Menschen von vor 100 Jahren gefunden werden. Am Kniegelenk konnte unter Einbeziehung aller Spezies ebenfalls eine positive Korrelation zwischen Lebenserwartung und mittlerer Knorpeldicke gefunden werden, ohne den Menschen konnte dieses Ergebnis jedoch nicht nachgewiesen werden. Zwischen Gelenkflächengröße und Lebenserwartung konnten, sowohl am Knie-, als auch am Ellbogengelenk keine signifikanten Korrelationen gefunden werden.

Einen Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen Knorpelmorphologie und Lebenserwartung am Kniegelenk geben Untersuchungen an älteren Menschen, die zeigen dass die Knorpeldicke im Alter physiologisch abnimmt (Hudelmaier et al. 2001). Als Grund hierfür wird der physiologische Flüssigkeitsverlust im Alter diskutiert. Einen Zusammenhang zwischen Knorpeldicke und Flüssigkeitsgehalt beschreibt auch die Studie von Stockwell (Stockwell 1971). Dort wurde gezeigt, dass bei Spezies mit einem verhältnismäßig dickeren Gelenkknorpel ein höherer Flüssigkeitsgehalt im Knorpel vorliegt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie legen nahe, dass die mittlere Knorpeldicke des Ellbogengelenks unter anderem von der Lebenserwartung einer Spezies beeinflusst werden könnte. Der Parameter Körpergewicht scheint für die Ausprägung Morphologie der Knorpeldicke eine geringere Rolle zu spielen, als die

Lebenserwartung, wobei selbstverständlich berücksichtigt werden muss, dass von Korrelationen nicht auf Kausalitäten geschlossen werden kann. Unter Entfernung des Menschen aus dieser Berechnung waren die Korrelationen deutlicher ausgeprägt, was darauf hinweist, dass der Mensch in diesem Zusammenhang eine Sonderrolle einnimmt. Dafür spricht auch, dass mit der Berechnung der Korrelation von Lebenserwartung und Knorpeldicke mit der Lebenserwartung des Menschen von vor 100 Jahren eine höhere Korrelation gefunden wurde, als mit der aktuellen Lebenserwartung des Menschen, die anders als bei anderen Spezies vom medizinischen Fortschritt bestimmt wurden. Am Kniegelenk konnte zwar auch eine positive Korrelation zwischen der Lebenserwartung und der Gelenkknorpeldicke gefunden werden, die unter Nicht-Berücksichtigung des Menschen, im Gegensatz zu den Daten am Ellbogengelenk, bedeutend geringer ausfiel. In der vorliegenden Studie konnte kein Grund für diese Diskrepanz gefunden werden.

Möglicherweise spielen evolutionsbedingte genetisch determinierte Faktoren eine Rolle in der Ausprägung der Gelenkknorpelmorphologie, die eine optimale Anpassung des Körpers einer Spezies an die entsprechende zu erwartende Lebensspanne ermöglichen. Die Ergebnisse könnten außerdem einen Hinweis darauf geben, dass der Gelenkknorpel im Laufe eines Lebens zunehmend „abgenutzt“ wird und die Natur daher eine an die Lebenslänge einer Spezies angepasste Knorpeldicke zur Verfügung stellt. Der Mensch weist unter allen untersuchten Spezies die längste Lebenserwartung auf. Es könnte jedoch auch ein Grund dafür sein, dass beim Menschen der dickste Gelenkknorpel aller Spezies gefunden wurde. Da die Dicke des Gelenkknorpels für die Aufrechterhaltung seiner Funktion beim alternden Lebewesen eine wichtige Rolle spielt, ist anzunehmen, dass sich bei der genannten, alterungsbedingten Abnahme der Knorpeldicke die physiologischen und mechanischen Eigenschaften des Gewebes vermindern. Die hohe und zunehmende Inzidenz degenerativer Gelenkerkrankungen

beim alternden Menschen könnte darauf hinweisen, dass durch die moderne Humanmedizin die Lebenserwartung des Menschen so verlängert werden konnte, dass möglicherweise die genetische, von der Natur „vorgesehene“ Lebenserwartung des Menschen überschritten wurde.

### **6.2.3. Gelenkknorpel und Gangart**

In vergleichenden Studien zwischen Mensch und anderen Säugetieren (Stockwell 1971; Kaab et al. 1998) war beim Rind und nicht beim Menschen die größte maximale Knorpeldicke beschrieben, allerdings konnte auch hier schon gezeigt werden, dass der Mensch im Verhältnis zu seinem Körpergewicht eine größere Knorpeldicke besitzt als die anderen untersuchten Spezies (Kaab et al. 1998). In der vorliegenden Studie war bei Mensch und Schimpansen sowohl am Ellbogengelenk als auch am Kniegelenk die Gelenkflächengröße und die mittlere Knorpeldicke, im Verhältnis zum Körpergewicht, größer als bei den übrigen untersuchten Spezies. Der Mensch wies unter allen untersuchten Spezies am Kniegelenk den dicksten mittleren und maximalen Gelenkknorpel auf, auch im Vergleich zu Spezies, die ein mehr als zehnfaches Körpergewicht aufweisen.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass Mensch und Schimpanse eine Sonderstellung bei den untersuchten Spezies einnehmen. Beide Spezies verwenden die vordere Extremität vornehmlich zu taktilen und feinmotorischen Tätigkeiten, bzw. zu arboraler Fortbewegung beim Schimpansen, wohingegen quadrupede Spezies ihre vordere Extremität fast ausschließlich zur Fortbewegung verwenden (Grizmeck 1967). Vergleichende Untersuchungen an vierbeinigen Primaten und vierbeinigen Nicht-Primaten, zeigten, dass bei den sich vierbeinig fortbewegenden Spezies, die nicht zu den Primaten gerechnet werden, die vordere Extremität größeren vertikalen Kräften ausgesetzt ist, als die hintere Extremität. Bei den sich vierbeinig fortbewegenden

Primaten hingegen sind die Hinterbeine sowohl beim Gehen als auch beim Rennen größeren Kräften ausgesetzt als die Vorderbeine (Schmitt 2003). Diese morphologischen und funktionellen Unterschiede werden auf die arborale Fortbewegung (auf Bäumen) vieler Primatenspezies und eine daraus resultierende funktionelle Differenzierung zurückgeführt (Schmitt 2003). Im Vergleich zu anderen Spezies führen die menschlichen Extremitäten beim bipeden Gang nur geringe Flexionsbewegungen aus (Reynolds 1987), diese spezialisierten Bewegungsabläufe beim Menschen ermöglichen einen an die Bewegungsform angepassten, geringen Energieverbrauch (Kimura 1996).

Möglicherweise beeinflusst die andere Belastungssituation der Ellbogengelenke bipeder Spezies, wie Klettern bei den Primaten und erweiterte feinmotorische Fertigkeiten beim Menschen und Primaten und das daraus resultierende Zusammenspiel der Muskulatur die Knorpelmorphologie so, dass bei diesen Spezies, im Verhältnis zum Körpergewicht, größere Gelenkflächen und ein dickerer Gelenkknorpel als bei den quadrupeden Spezies vorhanden sind, welche die vorderen Extremitäten rein zur Fortbewegung nutzen. Für die im Verhältnis zu den nicht-hominoiden Spezies größere Gelenkfläche und Knorpeldicke am Kniegelenk von Mensch Schimpansen ist möglicherweise der obligat bzw. fakultativ bipede Gang der Spezies verantwortlich. Sollte die beim Schimpansen und Menschen beobachteten größeren Gelenkflächen und dickeren Knorpel in Ellbogen-, und Kniegelenk Ausdruck einer funktionellen Anpassung an die spezifische mechanische Belastung darstellen, so kann diese zumindest nicht in einfacher Weise anhand der beim Gehen auftretenden Gelenkkkräfte erklärt werden.

Beim fakultativ bipeden Biber konnte an der vorderen Extremität eine verhältnismäßig kleinere Gelenkflächengröße im Vergleich zu den übrigen Spezies gezeigt werden. Die Knorpeldicke des Ellbogengelenks und die Gelenkflächengröße

bzw. die Knorpeldicke des Kniegelenks, das der Biber zur Fortbewegung im Wasser und auf dem Land benötigt, ist vergleichbar mit der quadrupeder Tiere. Die häufig schwimmende Fortbewegung des Bibers (Grizmeck 1967), bei der die vordere Extremität an den Körper angelegt wird, könnte für die Morphologie des Gelenks seines Vorderlaufs verantwortlich sein. Möglicherweise wird die vordere Extremität des Bibers sowohl beim Schwimmen, wobei er die vorderen Extremitäten an den Oberkörper anlegt, als auch bei der fakultativ bipeden Fortbewegung auf dem Land, im Verhältnis zu den übrigen untersuchten Spezies, geringer belastet, so dass hier eine kleinere Gelenkflächengröße ausreicht. Bei Mensch und Schimpansen, bei denen die vorderen Extremitäten zum Klettern und zu feinmotorischen Tätigkeiten verwendet werden, sind die Belastungen möglicherweise im Verhältnis zum Biber größer.

Zwischen den übrigen untersuchten fakultativ bipeden (Schwarzbär, Pavian, Mandrill, Kaninchen) und den quadrupeden Spezies konnte sowohl am Ellbogen-, als auch am Kniegelenk kein offensichtlicher Unterschied der Gelenkknorpelmorphologie beobachtet werden. Somit scheint der fakultativ bipede Gang dieser Spezies keinen entwicklungsgeschichtlichen Einfluss auf die Knorpelmorphologie zu haben. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass diese Spezies ihre vorderen Extremitäten, im Gegensatz zu Mensch und Primaten, nicht in diesem Maße für feinmotorische Tätigkeiten und Klettern verwenden. Die vergleichende Gelenkknorpelmorphologie von vorderer und hinterer Extremität scheint also von mehr als nur den diskutierten Einflussfaktoren Körpergewicht, Lebenserwartung und Lokomotionsmuster abzuhängen, individuelle Anpassungsmechanismen an die Umweltbedingungen der einzelnen Spezies könnten hier zusätzlich eine Rolle spielen.

### **6.2.5. Einflussfaktoren auf die prozentuale Verteilung und die mittleren Knorpeldicken an den Einzelflächen**

Am Ellbogengelenk wies bei allen untersuchten Spezies der Gelenkknorpel des Humerus den größten Flächenanteil auf. Den zweitgrößten Flächenanteil nahm der Radius ein und den geringsten Anteil an der Gesamtknorpelfläche der ulnare Gelenkknorpel. Am Kniegelenk war bei allen Spezies am Femur die größte Knorpelfläche zu finden. Den zweitgrößten Flächenanteil nahm bei allen Spezies die Tibia und den geringsten die Patella ein. Die mittlere Knorpeldicke des Ellbogengelenks zeigte bei Mensch, Pavian, Rind und Schwein am Humerus, bei Schimpanse, Mandrill, Nashorn und Pferd am Radius und bei Biber, Hund, Wildkatze und Katze an der Ulna die jeweils größten Werte. Am Kniegelenk wurden die größten Werte für die mittlere Knorpeldicke beim Rind, Pferd, Schwein und Mensch an der Patella, beim Schwarzbär, Schimpansen, Hund, Pavian, Biber, Mandrill, Wildkatze, Katze und Kaninchen dagegen an der Tibia gefunden. Es konnten keine Zusammenhänge zwischen dem Körpergewicht der Spezies und den Verteilungen der mittleren Knorpeldicken beobachtet werden.

Die beschriebenen prozentualen Verteilungen der Gelenkknorpelflächengrößen an Knie-, und Ellbogengelenk weisen bei allen untersuchten Spezies dieselben Verteilungen auf. Somit scheint weder im Rahmen der Anpassung an einen obligat bzw. fakultativ bipeden Gang eine Veränderung der Flächenverhältnisse nötig bzw. sinnvoll gewesen zu sein. Diese Ergebnisse weisen einerseits darauf hin, dass möglicherweise evolutionsmorphologische Unterschiede zwischen großen und kleinen Landsäugetern zu existieren scheinen, da bei größeren Säugern tendenziell Radius bzw. Patella, bei kleineren hingegen tendenziell Ulna und Tibia einen dickeren Gelenkknorpel aufweisen. Die Schwerkraft als konstanter Parameter und ihre Auswirkung auf unterschiedlich große Tiere könnte hier einen Einflussfaktor darstellen. Andererseits können diese



Ergebnisse einen Hinweis darauf geben, dass der bipede Gang beim Menschen und die daraus resultierende unterschiedliche Geometrie der unteren Extremitäten eine Anpassung vor allem der patellaren Gelenkknorpeldicke nötig machten, hingegen beim gemischt bipeden-quadrupeden Gang eher der tibiale Gelenkknorpel belastet wird.

#### **6.2.6. Verhältnisse von Knorpel-Knochen-Grenze und Knorpeldicke an Ellbogen- und Kniegelenk**

Die Knorpel-Knochen-Grenze war bei allen Spezies, außer dem Mandrill, am Kniegelenk größer, als am Ellbogengelenk. Auch waren bei allen Spezies, außer bei Mandrill, Haushund und Wildkatze, am Kniegelenk größere mittlere Knorpeldicken zu finden, als am Ellbogengelenk.

Bei obligat quadrupeden Spezies, deren Körperschwerpunkt rostral liegt, fand Simon ebenfalls am Kniegelenk einen dickeren Gelenkknorpel als am Ellbogengelenk (Simon 1970). Vergleichende Untersuchungen zeigten, dass bei den sich vierbeinig fortbewegenden Spezies, die nicht zu den Primaten gerechnet werden, die vordere Extremität größeren vertikalen Kräften ausgesetzt ist, als die hintere Extremität (Schmitt 2003). Bei den sich vierbeinig fortbewegenden Primaten hingegen sind die Hinterbeine, sowohl beim Gehen, als auch beim Rennen, größeren Kräften ausgesetzt, als die Vorderbeine. Sowohl bei den bipeden, als auch bei den quadrupeden Spezies haben allerdings die Hinterbeine einen größeren Anteil des Körpergewichts zu tragen, als die Vorderbeine (Schmitt 2003). Die vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei allen untersuchten Spezies die Gesamtheit der Anforderungen an den Gelenkknorpel des Kniegelenkes und an den des Ellbogengelenkes unterschiedlich zu sein scheinen, was sich bei einem Großteil der Spezies durch größere Gelenkflächen und dickere Gelenkknorpel am Kniegelenk äußert. Bei Schimpanse, Haushund und Wildkatze zeigte

sich am Ellbogengelenk ein dickerer Gelenkknorpel, als am Kniegelenk, wofür wir keine sinnvolle Erklärung haben.

### 6.3. Schlussfolgerungen

1. Die Gelenkflächengrößen von Knie-, und Ellenbogengelenk sind bei höherem Körpergewicht einer Spezies höher. Dahingegen scheinen die mittleren Knorpeldicken dieser Gelenke in deutlich geringerem Maße vom Körpergewicht beeinflusst zu sein. Bei Säugetieren scheinen daher vom Körpergewicht abhängige Anpassungsmechanismen zu existieren, die in erster Linie über eine Modifikation der Gelenkflächengröße stattfinden. Erklären lässt sich das, wenn man davon ausgeht, dass das Körpergewicht proportional der einwirkenden Kraft ist. Da Kraft pro Fläche dem einwirkenden Druck entspricht scheint eine Anpassung an die Krafteinwirkung bis zu einem gewissen grenzwertigen Druck über eine Flächervergrößerung zu erfolgen.
2. Die mittlere Dicke des Gelenkknorpels an Ellbogen-, und Kniegelenk scheint mit der durchschnittlichen Lebenserwartung einer Spezies in Zusammenhang zu stehen. Auf die Gelenkflächengrößen an Knie-, und Ellbogengelenk scheint die Lebenserwartung keinen Einfluss zu haben.
3. Mensch und Schimpanse weisen verglichen mit den quadrupeden Spezies mit gleichem Körpergewicht eine größere Gelenkflächengröße und eine größere Gelenkknorpeldicke auf. Der Biber zeigte am Ellbogengelenk eine kleinere Gelenkflächengröße im Verhältnis zum Körpergewicht als die übrigen Spezies.
4. Die Verhältnisse der mittleren Knorpeldicken bzw. Gelenkflächengrößen von Ellbogen-, und Kniegelenk lassen sich letztendlich nicht eindeutig durch die Fortbewegungsart erklären. Ein komplexes Zusammenspiel an modifizierten, anatomischen Gegebenheiten, Bewegungsabläufen, sowie einwirkenden Kräften spielen hier möglicherweise eine Rolle.

## 7. Zusammenfassung

Bisherige vergleichende Untersuchungen des hyalinen Gelenkknorpels zwischen Spezies beschränkten sich auf eine kleine Anzahl von Tierarten und auf Methoden, die nur einzelne Lokalisationen, und nicht ganze Knorpelplatten, beurteilen konnten. Ziel der vorliegenden Studie war es, den hyalinen Gelenkknorpel des Knie-, und des Ellbogengelenks an einer großen Anzahl von Tierarten vergleichend zu untersuchen. Die Methode der Wahl stellte dabei die Magnetresonanztomographie mit für die Visualisierung des Gelenkknorpels optimierten Sequenzen dar. Es sollten verschiedene Einflussfaktoren auf die Gelenkknorpelmorphologie beurteilt werden. Bei der Auswahl der Spezies wurde darauf geachtet, dass sowohl obligat quadrupede, als auch obligat, bzw. fakultativ bipede Spezies untersucht wurden.

Wir untersuchten den Gelenkknorpel des Knie-, und Ellenbogengelenks von 12 (Ellbogengelenk) beziehungsweise 14 (Kniegelenk) unterschiedlichen Säugetierspezies. Dabei wurden die morphologischen Parameter maximale Knorpeldicke, mittlere Knorpeldicke und Gelenkflächengröße anhand dreidimensionaler Bildanalyseverfahren quantitativ erfasst. Die Daten für das menschliche Kniegelenk stammen aus einem zuvor erhobenen Kollektiv ( $n = 142$ ), die für das Ellbogengelenk aus den Mittelwerten zweier Probanden und den Daten aus einer zuvor publizierten Studie.

Beim Ellbogengelenk fand sich ein positiver Zusammenhang zwischen dem Körpergewicht und der Gelenkflächengröße und in wesentlich geringerem Maße auch zwischen Körpergewicht und mittlerer Gelenkknorpeldicke einer Spezies. Es konnte ein positiver Zusammenhang zwischen der mittleren Lebenserwartung einer Spezies und der mittleren Knorpeldicke beschrieben werden. Am Kniegelenk zeigte sich ein positiver Zusammenhang zwischen dem Körpergewicht und der Gelenkflächengröße und der mittleren Knorpeldicke. Auch am Kniegelenk konnte allerdings ein positiver, jedoch

geringerer positiver Zusammenhang zwischen der Lebenserwartung und der mittleren Knorpeldicke gezeigt werden. Mensch und Schimpanse wiesen sowohl am Ellbogen-, als auch am Kniegelenk eine größere Gelenkfläche im Verhältnis zum Körpergewicht auf als die übrigen Spezies. Bei allen untersuchten Spezies konnten sowohl am Ellbogen-, (Humerus > Radius > Ulna) als auch am Kniegelenk, (Femur > Tibia > Patella) ähnliche Verteilungen der einzelnen Gelenkflächengrößen gezeigt werden, die nicht von den Parametern Körpergewicht oder Gangart abzuhängen scheinen. Die gesamte Gelenkfläche war bei allen Spezies, außer dem Mandrill, am Kniegelenk größer, als am Ellbogengelenk. Die mittlere Knorpeldicke war bei allen Spezies, außer bei Schimpanse, Haushund und Wildkatze am Kniegelenk größer, als am Ellbogengelenk.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass insbesondere die Gelenkflächengröße vom Körpergewicht einer Spezies abhängig zu sein scheint. Für die mittlere Gelenkknorpeldicke scheint das Körpergewicht einen geringeren, die Lebenserwartung jedoch einen gewissen Einflussparameter darzustellen. Beim bipeden Menschen, sowie den fakultativ bipeden Primaten zeigten sich, im Vergleich zu den quadrupeden Tieren, an den Kniegelenken keine deutlich größeren Gelenkflächen bzw. Knorpeldicken, als an den Ellbogengelenken im Vergleich zu den anderen Spezies, wie es vielleicht zu erwarten gewesen wäre. Es liegt also nahe, dass bei Mensch und Schimpansen im Rahmen von evolutionären Anpassungsmechanismen an feinmotorische Tätigkeiten, sowie dem Klettern dennoch insgesamt ähnliche morphologische Gegebenheiten der oberen Extremitäten wie für die quadrupede Fortbewegung ausreichten. Jedenfalls sind keine simplen Interpretationen über die beim Gehen wirkenden Vertikalkräfte möglich oder sinnvoll.

---

## 8. Literaturverzeichnis

1. Adam, G., Prescher, A., Nolte-Ernsting, C., Buhne, M., Scherer, K., Kupper, W., and Gunther, R. W. [MRI of the hyaline knee joint cartilages. Animal and clinical studies]. *Rofo Fortschr.Geb.Rontgenstr.Neuen Bildgeb.Verfahr.* 1994. 160: 143-148
2. Al Ali, D., Graichen, H., Faber, S., Englmeier, K. H., Reiser, M., and Eckstein, F. Quantitative cartilage imaging of the human hind foot: precision and inter-subject variability. *J.Orthop.Res.* 2002. 20: 249-256
3. Arokoski, J., Jurvelin, J., Kiviranta, I., Tammi, M., and Helminen, H. J. Softening of the lateral condyle articular cartilage in the canine knee joint after long distance (up to 40 km/day) running training lasting one year. *Int.J.Sports Med.* 1994. 15: 254-260
4. Ateshian, G. A., Lai, W. M., Zhu, W. B., and Mow, V. C. An asymptotic solution for the contact of two biphasic cartilage layers. *J.Biomech.* 1994. 27: 1347-1360
5. Ateshian, G. A. and Wang, H. A theoretical solution for the frictionless rolling contact of cylindrical biphasic articular cartilage layers. *J.Biomech.* 1995. 28: 1341-1355
6. Athanasiou, K. A., Rosenwasser, M. P., Buckwalter, J. A., Malinin, T. I., and Mow, V. C. Interspecies comparisons of in situ intrinsic mechanical properties of distal femoral cartilage. *J.Orthop.Res.* 1991. 9: 330-340
7. Baird, D. K., Hathcock, J. T., Rumph, P. F., Kincaid, S. A., and Visco, D. M. Low-field magnetic resonance imaging of the canine stifle joint: normal anatomy. *Vet.Radiol.Ultrasound.* 1998. 39: 87-97
8. Benninghoff and Drenckhahn, D. *Anatomie, Band 1.* 2003. 16: 128-132
9. Biewener, A. A. Allometry of quadrupedal locomotion: the scaling of duty factor, bone curvature and limb orientation to body size. *J.Exp.Biol.* 1983. 105:147-71.: 147-171
10. Blaik, M. A., Hanson, R. R., Kincaid, S. A., Hathcock, J. T., Hudson, J. A., and Baird, D. K. Low-field magnetic resonance imaging of the equine tarsus: normal anatomy. *Vet.Radiol.Ultrasound.* 2000. 41: 131-141
11. Burgkart, R., Glaser, C., Hyhlik-Durr, A., Englmeier, K. H., Reiser, M., and Eckstein, F. Magnetic resonance imaging-based assessment of cartilage loss in severe osteoarthritis: accuracy, precision, and diagnostic value. *Arthritis Rheum.* 2001. 44: 2072-2077

12. Carlson-Kuhta, P., Trank, T. V., and Smith, J. L. Forms of forward quadrupedal locomotion. II. A comparison of posture, hindlimb kinematics, and motor patterns for upslope and level walking. *J.Neurophysiol.* 1998. 79: 1687-1701
13. Carpenter, T. A., Everett, J. R., Hall, L. D., Harper, G. P., Hodgson, R. J., James, M. F., and Watson, P. J. High-resolution magnetic resonance imaging of arthritic pathology in the rat knee. *Skeletal Radiol.* 1994. 23: 429-437
14. Cavagna, G. A., Thys, H., and Zamboni, A. The sources of external work in level walking and running. *J.Physiol.* 1976. 262: 639-657
15. Clark, J. M. Variation of collagen fiber alignment in a joint surface: a scanning electron microscope study of the tibial plateau in dog, rabbit, and man. *J.Orthop.Res.* 1991. 9: 246-257
16. Cohen, Z. A., McCarthy, D. M., Kwak, S. D., Legrand, P., Fogarasi, F., Ciaccio, E. J., and Ateshian, G. A. Knee cartilage topography, thickness, and contact areas from MRI: in-vitro calibration and in-vivo measurements. *Osteoarthritis.Cartilage.* 1999. 7: 95-109
17. Dalla Palma, L., Cova, M., and Pozzi-Mucelli, R. S. MRI appearance of the articular cartilage in the knee according to age. *J Belge Radiol.* 1997. 80: 17-20
18. Darwin, C. *The origin of species.* 1859. 6:
19. Demes, B., Jungers, W. L., and Selpien, K. Body size, locomotion, and long bone cross-sectional geometry in indriid primates. *Am.J.Phys.Anthropol.* 1991. 86: 537-547
20. Denny, H. R. The canine elbow. *Br.Vet.J.* 1987. 143: 1-20
21. Eckstein, F., Adam, C., Sittek, H., Becker, C., Milz, S., Schulte, E., Reiser, M., and Putz, R. Non-invasive determination of cartilage thickness throughout joint surfaces using magnetic resonance imaging. *J.Biomech.* 1997b. 30: 285-289
22. Eckstein, F., Adam, C., Sittek, H., Becker, C., Milz, S., Schulte, E., Reiser, M., and Putz, R. Non-invasive determination of cartilage thickness throughout joint surfaces using magnetic resonance imaging. *J.Biomech.* 1997a. 30: 285-289
23. Eckstein, F., Burstein, D., and Link, T. M. Quantitative MRI of cartilage and bone: degenerative changes in osteoarthritis. *NMR Biomed.* 2006a. 19: 822-854

24. Eckstein, F., Cicuttini, F., Raynauld, J. P., Waterton, J. C., and Peterfy, C. Magnetic resonance imaging (MRI) of articular cartilage in knee osteoarthritis (OA): morphological assessment. *Osteoarthritis.Cartilage*. 2006b. 14 Suppl A:A46-75. Epub;%2006 May;%19.: A46-A75
25. Eckstein, F., Gavazzeni, A., Sittek, H., Haubner, M., Losch, A., Milz, S., Englmeier, K. H., Schulte, E., Putz, R., and Reiser, M. Determination of knee joint cartilage thickness using three-dimensional magnetic resonance chondro-crassometry (3D MR-CCM). *Magn Reson.Med*. 1996a. 36: 256-265
26. Eckstein, F., Gavazzeni, A., Sittek, H., Haubner, M., Losch, A., Milz, S., Englmeier, K. H., Schulte, E., Putz, R., and Reiser, M. Determination of knee joint cartilage thickness using three-dimensional magnetic resonance chondro-crassometry (3D MR-CCM). *Magn Reson.Med*. 1996b. 36: 256-265
27. Eckstein, F. and Glaser, C. Measuring cartilage morphology with quantitative magnetic resonance imaging. *Semin.Musculoskelet.Radiol*. 2004. 8: 329-353
28. Eckstein, F., Heudorfer, L., Faber, S. C., Burgkart, R., Englmeier, K. H., and Reiser, M. Long-term and resegmentation precision of quantitative cartilage MR imaging (qMRI). *Osteoarthritis.Cartilage*. 2002. 10: 922-928
29. Eckstein, F., Reiser, M., Englmeier, K. H., and Putz, R. In vivo morphometry and functional analysis of human articular cartilage with quantitative magnetic resonance imaging--from image to data, from data to theory. *Anat.Embryol.(Berl)*. 2001a. 203: 147-173
30. Eckstein, F., Tieschky, M., Faber, S. C., Haubner, M., Kolem, H., Englmeier, K. H., and Reiser, M. Effect of physical exercise on cartilage volume and thickness in vivo: MR imaging study. *Radiology*. 1998a. 207: 243-248
31. Eckstein, F., Westhoff, J., Sittek, H., Maag, K. P., Haubner, M., Faber, S., Englmeier, K. H., and Reiser, M. In vivo reproducibility of three-dimensional cartilage volume and thickness measurements with MR imaging. *AJR Am.J.Roentgenol*. 1998b. 170: 593-597
32. Eckstein, F., Winzheimer, M., Hohe, J., Englmeier, K. H., and Reiser, M. Interindividual variability and correlation among morphological parameters of knee joint cartilage plates: analysis with three-dimensional MR imaging. *Osteoarthritis.Cartilage*. 2001b. 9: 101-111
33. Fischer, M. S., Schilling, N., Schmidt, M., Haarhaus, D., and Witte, H. Basic limb kinematics of small therian mammals. *J.Exp.Biol*. 2002. 205: 1315-1338

34. Frank, L. R., Wong, E. C., Luh, W. M., Ahn, J. M., and Resnick, D. Articular cartilage in the knee: mapping of the physiologic parameters at MR imaging with a local gradient coil--preliminary results. *Radiology*. 1999. 210: 241-246
35. Gahunia, H. K., Lemaire, C., Babyn, P. S., Cross, A. R., Kessler, M. J., and Pritzker, K. P. Osteoarthritis in rhesus macaque knee joint: quantitative magnetic resonance imaging tissue characterization of articular cartilage. *J.Rheumatol*. 1995. 22: 1747-1756
36. Gahunia, H. K., Lemaire, C., Cross, A. R., Babyn, P., Kessler, M. J., and Pritzker, K. P. Osteoarthritis in rhesus macaques: assessment of cartilage matrix quality by quantitative magnetic resonance imaging. *Agents Actions Suppl*. 1993. 39:255-9.: 255-259
37. Gardner, D. L. and McGillivray, D. C. Articular cartilage is not smooth: an investigation by immersion incident-light microscopy. *J.Pathol*. 1970. 101: ix-ix
38. Glaser, C., Faber, S., Eckstein, F., Fischer, H., Springer, V., Heudorfer, L., Stammberger, T., Englmeier, K. H., and Reiser, M. Optimization and validation of a rapid high-resolution T1-w 3D FLASH water excitation MRI sequence for the quantitative assessment of articular cartilage volume and thickness. *Magn Reson.Imaging*. 2001. 19: 177-185
39. Glaser, C. and Putz, R. Functional anatomy of articular cartilage under compressive loading Quantitative aspects of global, local and zonal reactions of the collagenous network with respect to the surface integrity. *Osteoarthritis.Cartilage*. 2002. 10: 83-99
40. Gore, DM, Higginson, GR, and Minns, RJ. Compliance of articular cartilage and its variation through the thickness. *Phys Med Biol*. 1983. 28: 233-247
41. Graichen, H., Eisenhart-Rothe, R., Vogl, T., Englmeier, K. H., and Eckstein, F. Quantitative assessment of cartilage status in osteoarthritis by quantitative magnetic resonance imaging: technical validation for use in analysis of cartilage volume and further morphologic parameters. *Arthritis Rheum*. 2004. 50: 811-816
42. Graichen, H., Springer, V., Flaman, T., Stammberger, T., Glaser, C., Englmeier, K. H., Reiser, M., and Eckstein, F. Validation of high-resolution water-excitation magnetic resonance imaging for quantitative assessment of thin cartilage layers. *Osteoarthritis.Cartilage*. 2000. 8: 106-114
43. Grizmeck, B. *Grizmeck's Tierleben*. 1967.
44. Guilak, F. Compression-induced changes in the shape and volume of the chondrocyte nucleus. *J Biomech*. 1995. 28: 1529-1541



45. Guilak, F., Ratcliffe, A., and Mow V.C. Chondrocyte deformation and local tissue strain in articular cartilage: a confocal microscopy study. *J Orthop Res.* 1995. 13: 410-421
46. Haapala, J., Arokoski, J., Pirttimäki, J., Lyyra, T., Jurvelin, J., Tammi, M., Helminen, H. J., and Kiviranta, I. Incomplete restoration of immobilization induced softening of young beagle knee articular cartilage after 50-week remobilization. *Int.J.Sports Med.* 2000. 21: 76-81
47. Haapala, J., Arokoski, J. P., Hyttinen, M. M., Lammi, M., Tammi, M., Kovanen, V., Helminen, H. J., and Kiviranta, I. Remobilization does not fully restore immobilization induced articular cartilage atrophy. *Clin.Orthop.* 1999. 218-229
48. Hanna, J. B., Polk, J. D., and Schmitt, D. Forelimb and hindlimb forces in walking and galloping primates. *Am.J.Phys.Anthropol.* 2006. 19: 1-10
49. Herberhold, C., Faber, S., Stammberger, T., Steinlechner, M., Putz, R., Englmeier, K. H., Reiser, M., and Eckstein, F. In situ measurement of articular cartilage deformation in intact femoropatellar joints under static loading. *J.Biomech.* 1999. 32: 1287-1295
50. Hohe, J., Faber, S., Muehlbauer, R., Reiser, M., Englmeier, K. H., and Eckstein, F. Three-dimensional analysis and visualization of regional MR signal intensity distribution of articular cartilage. *Med.Eng Phys.* 2002. 24: 219-227
51. Hohe, J., Faber, S., Stammberger, T., Reiser, M., Englmeier, K. H., and Eckstein, F. A technique for 3D in vivo quantification of proton density and magnetization transfer coefficients of knee joint cartilage. *Osteoarthritis.Cartilage.* 2000. 8: 426-433
52. Huang, C. Y., Soltz, M. A., Kopacz, M., Mow, V. C., and Ateshian, G. A. Experimental verification of the roles of intrinsic matrix viscoelasticity and tension-compression nonlinearity in the biphasic response of cartilage. *J.Biomech.Eng.* 2003. 125: 84-93
53. Hudelmaier, M., Glaser, C., Englmeier, K. H., Reiser, M., Putz, R., and Eckstein, F. Correlation of knee-joint cartilage morphology with muscle cross-sectional areas vs. anthropometric variables. *Anat.Rec.A Discov.Mol.Cell Evol.Biol.* 2003. 270: 175-184
54. Hudelmaier, M., Glaser, C., Hohe, J., Englmeier, K. H., Reiser, M., Putz, R., and Eckstein, F. Age-related changes in the morphology and deformational behavior of knee joint cartilage. *Arthritis Rheum.* 2001. 44: 2556-2561
55. Hung, S. C., Nakamura, K., Shiro, R., Tanaka, K., Kawahara, H., and Kurokawa, T. Effects of continuous distraction on cartilage in a moving joint: an investigation on adult rabbits. *J.Orthop.Res.* 1997. 15: 381-390

56. Hunziker, E. B. Articular cartilage repair: basic science and clinical progress. A review of the current status and prospects. *Osteoarthritis.Cartilage*. 2002. 10: 432-463
57. Hyhlik-Durr, A., Faber, S., Burgkart, R., Stammberger, T., Maag, K. P., Englmeier, K. H., Reiser, M., and Eckstein, F. Precision of tibial cartilage morphometry with a coronal water-excitation MR sequence. *Eur.Radiol*. 2000. 10: 297-303
58. Jeffery, A. K., Blunn, G. W., Archer, C. W., and Bentley, G. Three-dimensional collagen architecture in bovine articular cartilage. *J.Bone Joint Surg.Br*. 1991. 73: 795-801
59. Kaab, M. J., Gwynn, I. A., and Notzli, H. P. Collagen fibre arrangement in the tibial plateau articular cartilage of man and other mammalian species. *J.Anat*. 1998. 193: 23-34
60. Karvonen, R. L., Negendank, W. G., Teitge, R. A., Reed, A. H., Miller, P. R., and Fernandez-Madrid, F. Factors affecting articular cartilage thickness in osteoarthritis and aging. *J Rheumatol*. 1994. 21: 1310-1318
61. Kimura, T. Centre of gravity of the body during the ontogeny of chimpanzee bipedal walking. *Folia Primatol.(Basel)*. 1996. 66: 126-136
62. Kiviranta, I., Tammi, M., Jurvelin, J., Arokoski, J., Saamanen, A. M., and Helminen, H. J. Articular cartilage thickness and glycosaminoglycan distribution in the young canine knee joint after remobilization of the immobilized limb. *J.Orthop.Res*. 1994. 12: 161-167
63. Kiviranta, I., Tammi, M., Jurvelin, J., and Helminen, H. J. Topographical variation of glycosaminoglycan content and cartilage thickness in canine knee (stifle) joint cartilage. Application of the microspectrophotometric method. *J.Anat*. 1987. 150:265-76.: 265-276
64. Kiviranta, I., Tammi, M., Jurvelin, J., Saamanen, A. M., and Helminen, H. J. Moderate running exercise augments glycosaminoglycans and thickness of articular cartilage in the knee joint of young beagle dogs. *J.Orthop.Res*. 1988. 6: 188-195
65. Koh, H. L., Kshirsagar, H. L., Herrod, N. J., Carpenter, T. A., Hall, L. D., Hunziker, E. B., and Tyler, J. A. Visualization by magnetic resonance imaging of focal cartilage lesions in the excised mini-pig knee. *J.Orthop.Res*. 1996. 14: 554-561
66. Lane, J. M. and Weiss, C. Review of articular cartilage collagen research. *Arthritis Rheum*. 1975. 18: 553-562

67. Lehner, K. B., Rechl, H. P., Gmeinwieser, J. K., Heuck, A. F., Lukas, H. P., and Kohl, H. P. Structure, function, and degeneration of bovine hyaline cartilage: assessment with MR imaging in vitro. *Radiology*. 1989. 170: 495-499
68. Link, T. M., Lindner, N., Haeussler, M., Reimer, P., Allkemper, T., Jerosch, J., Peterfy, C., Majumdar, S., and Peters, P. E. Artificially produced cartilage lesions in small joints: detection with optimized MRI-sequences. *Magn Reson.Imaging*. 1997a. 15: 949-956
69. Link, T. M., Lindner, N., Haeussler, M., Reimer, P., Allkemper, T., Jerosch, J., Peterfy, C., Majumdar, S., and Peters, P. E. Artificially produced cartilage lesions in small joints: detection with optimized MRI-sequences. *Magn Reson.Imaging*. 1997b. 15: 949-956
70. Link, T. M., Majumdar, S., Peterfy, C., Daldrup, H. E., Uffmann, M., Dowling, C., Steinbach, L., and Genant, H. K. High resolution MRI of small joints: impact of spatial resolution on diagnostic performance and SNR. *Magn Reson.Imaging*. 1998. 16: 147-155
71. Lodder, M. A. Functional morphology of the hindleg in two kangaroos *Macropus giganteus* and *Aepyprymnus rufescens*. *Eur.J.Morphol*. 1991. 29: 5-30
72. Loeuille, D., Gonord, P., Guingamp, C., Gillet, P., Blum, A., Sauzade, M., and Netter, P. In vitro magnetic resonance microimaging of experimental osteoarthritis in the rat knee joint. *J Rheumatol*. 1997. 24: 133-139
73. Mankin, H. J. and Thrasher, A. Z. Water content and binding in normal and osteoarthritic human cartilage. *J.Bone Joint Surg.Am*. 1975. 57: 76-80
74. Maroudas A. Physical chemistry of articular cartilage and the intervertebral disc. 1980. 239-291
75. Maroudas A., Mizrahi, J., and Katz, E. P. Physiochemical properties and functional behavior of normal and osteoarthritic human cartilage. 1986. 311-329
76. Maroudas A., Schneidermann, R., and Popper, O. The role of water, proteoglycane, and collagen in solute transport in cartilage. 1992. 355-370
77. Marshall, K. W., Guthrie, B. T., and Mikulis, D. J. Quantitative cartilage imaging. *Br.J.Rheumatol*. 1995a. 34 Suppl 1:29-31.: 29-31
78. Marshall, K. W., Mikulis, D. J., and Guthrie, B. M. Quantitation of articular cartilage using magnetic resonance imaging and three-dimensional reconstruction. *J.Orthop.Res*. 1995b. 13: 814-823

79. Martinelli, M. J., Baker, G. J., Clarkson, R. B., Eurell, J. C., Pijanowski, G. J., and Kuriashkin, I. V. Magnetic resonance imaging of degenerative joint disease in a horse: a comparison to other diagnostic techniques. *Equine Vet.J.* 1996. 28: 410-415
80. Mow, V. C., Holmes, M. H., and Lai, W. M. Fluid transport and mechanical properties of articular cartilage: a review. *J.Biomech.* 1984. 17: 377-394
81. Mow, V. C., Kuei, S. C., Lai, W. M., and Armstrong, C. G. Biphasic creep and stress relaxation of articular cartilage in compression? Theory and experiments. *J.Biomech.Eng.* 1980. 102: 73-84
82. Mow, V. C. and Ratcliffe. Structure and function of articular cartilage and meniscus. 1997. 113-117
83. Mow, V. C., Ratcliffe, A., and Poole, A. R. Cartilage and diarthrodial joints as paradigms for hierarchical materials and structures. *Biomaterials.* 1992. 13: 67-97
84. Newton, P. M., Mow, V. C., Gardner, T. R., Buckwalter, J. A., and Albright, J. P. Winner of the 1996 Cabaud Award. The effect of lifelong exercise on canine articular cartilage. *Am.J.Sports Med.* 1997. 25: 282-287
85. Nickel, R., Schummer, A., and Seiferle, E. *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere I.* 1968. 3:
86. Nixon, A. J. Arthroscopic approaches and intraarticular anatomy of the equine elbow. *Vet.Surg.* 1990. 19: 93-101
87. Pandy, M. G. and Berme, N. Synthesis of human walking: a planar model for single support. *J.Biomech.* 1988a. 21: 1053-1060
88. Pandy, M. G., Kumar, V., Berme, N., and Waldron, K. J. The dynamics of quadrupedal locomotion. *J.Biomech.Eng.* 1988b. 110: 230-237
89. Peterfy, C. G., Majumdar, S., Lang, P., van Dijke, C. F., Sack, K., and Genant, H. K. MR imaging of the arthritic knee: improved discrimination of cartilage, synovium, and effusion with pulsed saturation transfer and fat-suppressed T1-weighted sequences. *Radiology.* 1994a. 191: 413-419
90. Peterfy, C. G., van Dijke, C. F., Janzen, D. L., Gluer, C. C., Namba, R., Majumdar, S., Lang, P., and Genant, H. K. Quantification of articular cartilage in the knee with pulsed saturation transfer subtraction and fat-suppressed MR imaging: optimization and validation. *Radiology.* 1994b. 192: 485-491

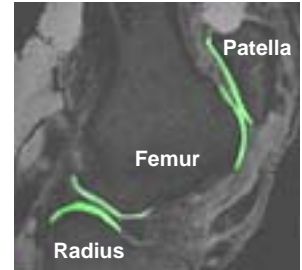
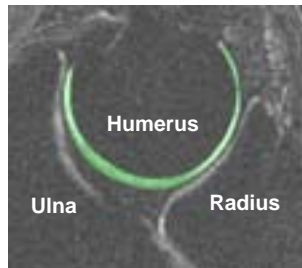
91. Peterfy, C. G., van Dijke, C. F., Lu, Y., Nguyen, A., Connick, T. J., Kneeland, J. B., Tirman, P. F., Lang, P., Dent, S., and Genant, H. K. Quantification of the volume of articular cartilage in the metacarpophalangeal joints of the hand: accuracy and precision of three-dimensional MR imaging. *AJR Am.J.Roentgenol.* 1995. 165: 371-375
92. Piplani, M. A., Disler, D. G., McCauley, T. R., Holmes, T. J., and Cousins, J. P. Articular cartilage volume in the knee: semiautomated determination from three-dimensional reformations of MR images. *Radiology.* 1996a. 198: 855-859
93. Piplani, M. A., Disler, D. G., McCauley, T. R., Holmes, T. J., and Cousins, J. P. Articular cartilage volume in the knee: semiautomated determination from three-dimensional reformations of MR images. *Radiology.* 1996b. 198: 855-859
94. Preuschoft, H. Muskeln und Gelenke der Hinterextremität des Gorillas. *Gegenbaurs.Morphol.Jahrb.* 1960. 101: 432-539
95. Putz, R. and Fischer, H. Altersunterschiede der Anordnung der kollagenen Fasern im Gelenkknorpel. *Osteologie aktuell.* 1993. VII: 42-44
96. Rasanen, T. and Messner, K. Regional variations of indentation stiffness and thickness of normal rabbit knee articular cartilage. *J.Biomed.Mater.Res.* 1996a. 31: 519-524
97. Rasanen, T. and Messner, K. Regional variations of indentation stiffness and thickness of normal rabbit knee articular cartilage. *J.Biomed.Mater.Res.* 1996b. 31: 519-524
98. Reynolds, T. R. Stride length and its determinants in humans, early hominids, primates, and mammals. *Am.J.Phys.Anthropol.* 1987. 72: 101-115
99. Robinson, E. M., Mackenzie, I. S., Freemont, A., and Jasani, M. K. High resolution nuclear magnetic resonance imaging of pig knees at 4.7 T. *Magn Reson.Imaging.* 1988. 6: 591-594
100. Rubin, C. T. and Lanyon, L. E. Dynamic strain similarity in vertebrates; an alternative to allometric limb bone scaling. *J.Theor.Biol.* 1984. 107: 321-327
101. Salomon, F. V. and Geyer, H. *omie der HaustiereAtlas der angewandten Anat.* 2003.
102. Schinagl, R. M., Gurskis, D., Chen, A. C., and Sah, R. L. Depth-dependent confined compression modulus of full-thickness bovine articular cartilage. *J Orthop Res.* 1997. 15: 499-506

103. Schmidt, M. and Fischer, M. S. Cineradiographic study of forelimb movements during quadrupedal walking in the brown lemur (*Eulemur fulvus*, Primates: Lemuridae). *Am.J.Phys.Anthropol.* 2000. 111: 245-262
104. Schmitt, D. Insights into the evolution of human bipedalism from experimental studies of humans and other primates. *J.Exp.Biol.* 2003. 206: 1437-1448
105. Setton, L. A., Zhu, W., and Mow, V. C. The biphasic poroviscoelastic behavior of articular cartilage: role of the surface zone in governing the compressive behavior. *J.Biomech.* 1993. 26: 581-592
106. Simon, W. H. Scale effects in animal joints. I. Articular cartilage thickness and compressive stress. *Arthritis Rheum.* 1970. 13: 244-256
107. Soltz, M. A. and Ateshian, G. A. Experimental verification and theoretical prediction of cartilage interstitial fluid pressurisation at an impermeable contact interface in confined compression. *J Biomech.* 1998. 31: 927-934
108. Springer, V., Graichen, H., Stammberger, T., Englmeier, K. H., Reiser, M., and Eckstein, F. [Noninvasive analysis of cartilage volume and cartilage thickness in the human elbow joint using MRI]. *Anat.Anz.* 1998. 180: 331-338
109. Stammberger, T., Eckstein, F., Englmeier, K. H., and Reiser, M. Determination of 3D cartilage thickness data from MR imaging: computational method and reproducibility in the living. *Magn Reson.Med.* 1999a. 41: 529-536
110. Stammberger, T., Eckstein, F., Michaelis, M., Englmeier, K. H., and Reiser, M. Interobserver reproducibility of quantitative cartilage measurements: comparison of B-spline snakes and manual segmentation. *Magn Reson.Imaging.* 1999b. 17: 1033-1042
111. Stockwell, R. A. The interrelationship of cell density and cartilage thickness in mammalian articular cartilage. *J.Anat.* 1971. 109: 411-421
112. Tebben, P. J., Pope, T. W., Hinson, G., Batnitzky, S., Wetzel, L. H., DePaolis, D. C., Munns, S., Wilkinson, S. B., and Gordon, M. A. Three-dimensional computerized reconstruction. Illustration of incremental articular cartilage thinning. *Invest Radiol.* 1997. 32: 475-484
113. Watson, P. J., Carpenter, T. A., Hall, L. D., and Tyler, J. A. MR protocols for imaging the guinea pig knee. *Magn Reson.Imaging.* 1997. 15: 957-970

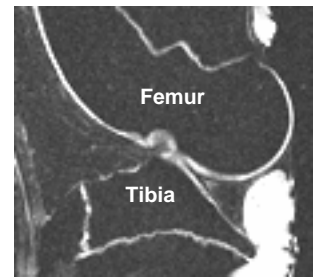
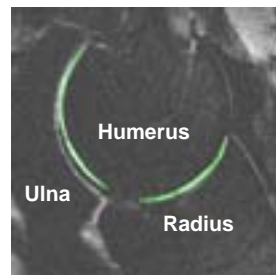
- 
114. Widmer, W. R., Buckwalter, K. A., Hill, M. A., Fessler, J. F., and Ivancevich, S. A technique for magnetic resonance imaging of equine cadaver specimens. *Vet.Radiol.Ultrasound*. 1999. 40: 10-14
  115. Wissdorf, H. [The elbow joint--articulatio cubiti--of the pig. Principles for intra-articular injections]. *Dtsch.Tierarztl.Wochenschr*. 1965. 72: 569-570
  116. Witte, H., Hoffmann, H., Hackert, R., Schilling, C., Fischer, M. S., and Preuschoft, H. Biomimetic robotics should be based on functional morphology. *J.Anat*. 2004. 204: 331-342
  117. Woodward, D. H., Gryfe, A., and Gardner, D. L. Comparative study by scanning electron microscopy of synovial surfaces of 4 mammalian species. *Experientia*. 1969. 25: 1301-1303
  118. Wu, J. Z., Herzog, W., and Ronsky, J. Modeling axi-symmetrical joint contact with biphasic cartilage layers-an asymptomatic solution. *J Biomech*. 1996. 29: 1263-1281
  119. Zivanovic, S. A note on the gorilla knee joint. *Anat.Anz*. 1972. 130: 91-98

## 9. Bildanhang

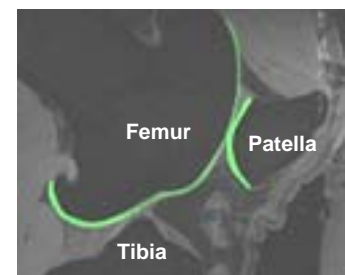
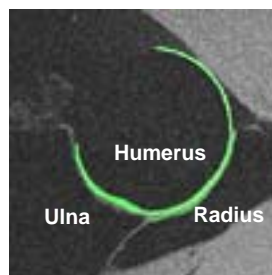
**Abb. 9.1. a-c Breitmaulnashorn**



**Abb. 9.2. a-c Hausrind**



**Abb. 9.3. a-c Hauspferd**

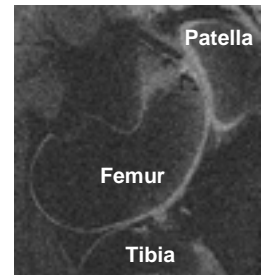


**Abb. 9.4. a & b Schwarzbär**

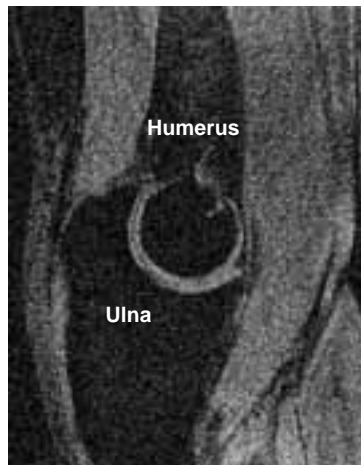




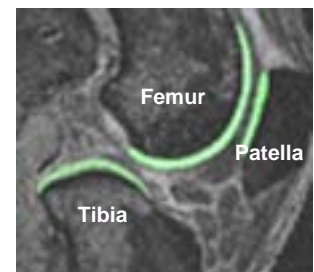
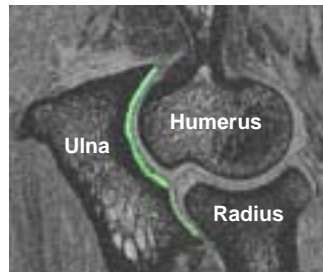
**Abb. 9.5. a-c Hausschwein**



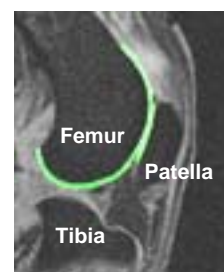
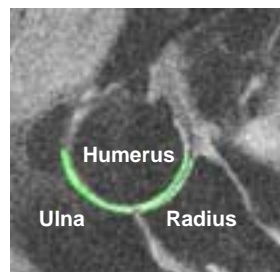
**Abb. 9.6. a-c Mensch**

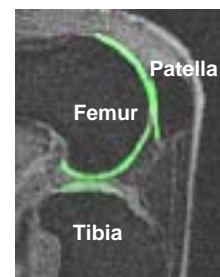
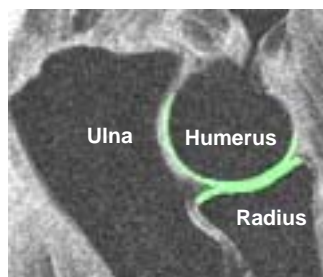
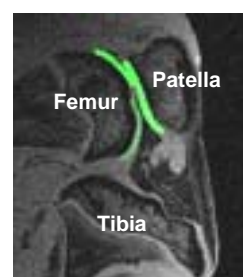
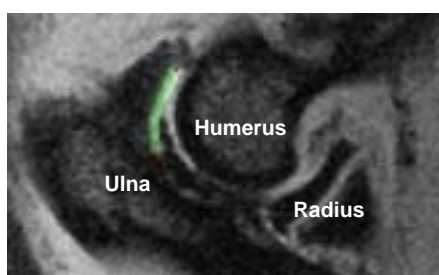
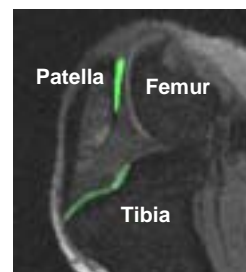
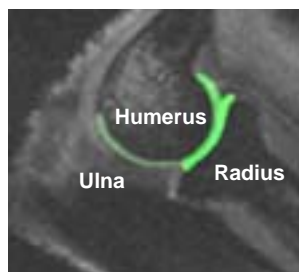
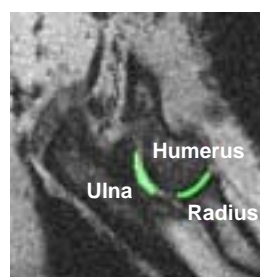


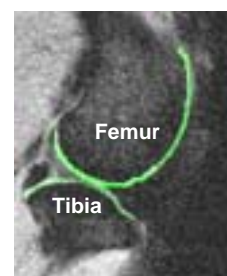
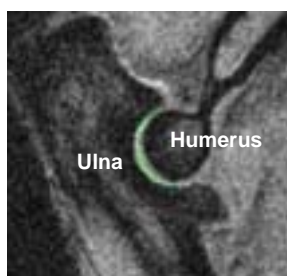
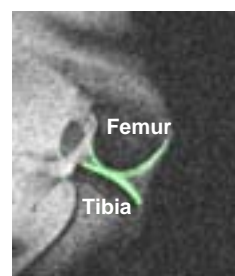
**Abb. 9.7. a-c Schimpanse**



**Abb. 9.8. a-c Haushund**



**Abb. 9.9. a-c Pavian****Abb. 9.10. a-c Biber****Abb. 9.11. a-c Mandrill****Abb. 9.12. a-c Wildkatze**

**Abb 9.13. a-c Hauskatze****Abb 9.14. a & b Hauskaninchen**

## 10. Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Prof. Dr. med. Eckstein für den Vorschlag zu dieser Arbeit, seine zuverlässige Unterstützung und seine unerschöpfliche und ansteckende wissenschaftliche Begeisterung. Er hat dazu beigetragen, mein Interesse an der Forschung zu wecken und mir für das für wissenschaftliches Arbeiten nötige „Handwerkszeug“ mitgegeben.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Dr. h.c. Reinhard Putz danken, der mir die Räumlichkeiten und Geräte der Anatomischen Anstalt zur Verfügung gestellt hat. Für die Bereitstellung des MRT-Gerätes möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Dr. h.c. M. Reiser vom Institut für Klinische Radiologie der LMU München des Klinikums Großhadern bedanken.

Bedanken möchte ich mich außerdem bei der Zoologischen Staatssammlung München, beim Anatomischen Institut der Veterinärmedizinischen Fakultät an der LMU München, beim Zoologischen Institut Berlin, beim Tiergarten Nürnberg, beim Schlachthof München und bei der Metzgerei Eberle in Prem für die Bereitstellung des Untersuchungsmaterials.

Danken möchte ich auch meinem Betreuer Martin Hudelmaier für seine Mitarbeit und seine Unterstützung bei der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt außerdem meinen Eltern, die mir das Studium der Humanmedizin ermöglicht haben. Ich möchte Ihnen vor Allem für ihre stetige Unterstützung, ihre endlose Geduld mit mir und ihr Vertrauen in mich danken.

München im August 2007

## 11. Lebenslauf

### Persönliche Daten:

Name	Astrid Ellen Grams
Geburtsdatum, und -ort	27.06.1978, München
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch

### Schulbildung:

09/1985 - 07/1989	Grundschule Lechbruck
09/1989 - 06/1998	Gymnasium Hohenschwangau
06/1998	Abitur

### Berufsausbildung:

10/1998 - 10/2000	Ausbildung zur staatlich anerkannten Rettungsassistentin, Paramed-Rettungsdienstschule Dietmannsried und MKT OHG München
-------------------	--

### Hochschulbildung:

04/2000 - 03/2002	Studium der Humanmedizin, Ludwig-Maximilians-Universität München
03/2002	Ärztliche Vorprüfung
Seit 04/2002	Studium der Humanmedizin, Technische Universität München
03/2003	erster Abschnitt der ärztlichen Prüfung
03/2005	zweiter Abschnitt der ärztlichen Prüfung
04/2006	dritter Abschnitt der ärztlichen Prüfung

### Famulaturen / Praktisches Jahr (PJ):

08/2002	Famulatur Unfall- und Allgemein Chirurgie, Kliniken Ostallgäu, Haus Füssen
02 - 03/2004	Famulatur Radiologie, Klinikum Rechts der Isar, TU-München
03 - 04/2004	Famulatur Pädiatrie, Landeskliniken Salzburg, Paracelsus Medizinische Universität, Österreich
09 - 10/2004	Famulatur Innere Medizin, Clinicas Maison de Santé, Lima, Peru
04 - 08/2005	PJ Innere Medizin (Hämatologie / Onkologie), Klinikum Rechts der Isar, TU-München
08 - 12/2005	PJ Radiologie, Kantonsspital Luzern, Schweiz
12/2005 - 01/2006	PJ Chirurgie (Kinder-, und Neurochirurgie), Queen Mary Hospital, University of Hong Kong, Hongkong
01/2006 – 03/2006	PJ Chirurgie (Herzchirurgie), Deutsches Herzzentrum, TU-München

### Berufstätigkeit:

10/1999 - 07/2003	Rettungsassistentin, MKT OHG München
09/2003 - 01/2004	Co-Assistentin im Präparierkurs der makroskopischen Anatomie, Anatomische Anstalt, Ludwig-Maximilians-Universität München
Seit 01/2004	Autorin und freie Mitarbeiterin, Elsevier GmbH (Urban & Fischer Verlag) München
06/2006 – 05/2007	Assistenzärztin, Neurochirurgische Klinik, Klinikum Rechts der Isar, TU-München
Seit 05/2007	Assistenzärztin, Abteilung für Neuroradiologie, Klinikum Rechts der Isar, TU-München

**Wissenschaftliche Tätigkeit (Poster):****Grams A; Hudelmaier M; Hildebrandt T; Putz R; Eckstein F:**

*Gelenkflächengrößen und Knorpeldicke bei Säugetieren verschiedener Größenordnung.*  
Deutsche Gesellschaft für Biomechanik DGfB  
München 29.05.2003 - 01.06.2003

**Grams A; Hudelmaier M; Hildebrandt T; Putz R; Eckstein F:**

*Gelenkflächengrößen und Knorpeldicke bei Säugetieren verschiedener Größenordnung.*  
Jahrestagung der Anatomischen Gesellschaft  
Würzburg 01.10.2003 - 03.10.2003

**Grams A; Hudelmaier M, Hildebrandt T; Putz R; Eckstein F:**

*Joint surface areas and cartilage thickness in mammals with a wide range of body weights.*  
Osteoarthritis Research Society International OARSI  
Berlin 12.10.2003 - 15.10.2003

**Grams A; Hudelmaier M, Hildebrandt T; Eckstein F:**

*Ratio of elbow versus knee joint cartilage morphology in biped and quadruped species.*  
Osteoarthritis Research Society International OARSI  
Boston 08.12.2005 - 11.12.2005

**Verlagsarbeit:****Astrid Grams:** *Durchblick Blutgerinnung,*

Elsevier GmbH München, © 2004, ISBN 3-437-41806-8

**Astrid Grams, Roland Mühlbauer:** *Vorklinik vernetzt,*

Elsevier GmbH München, © 2005, ISBN 3-437-43650-3

**Laurie Marbas, Erin Case** (Übersetzung aus dem Englischen von **Astrid Grams**):

*Memo-Tricks Biochemie* (englischer Titel: *Visual Mnemonics for Biochemistry*),  
Elsevier GmbH München, © 2005, ISBN 3-437-41033-4

**Laurie Marbas, Erin Case** (Übersetzung aus dem Englischen von **Astrid Grams**):

*Memo-Tricks Physiologie / Anatomie* (englischer Titel: *Visual Mnemonics for Physiology and Related Anatomy*),  
Elsevier GmbH München, © 2006, ISBN 3-437-41973-0