

5. DISKUSSION

Über die prae- und perinatale Entwicklung der Hundekralle²⁸ ist bis zum heutigen Zeitpunkt noch recht wenig bekannt. Die Publikationen über die Kralle des Hundes berücksichtigen lediglich die adulte Hundekralle (SEIDEL, 1992) sowie die Kralle der Fleischfresser im Allgemeinen (ZIETZSCHMANN, 1918). Kenntnisse zur Onto- und Phylogenese eines Organes sind jedoch die Grundlage, um dessen Aufbau verstehen zu können (ERNST, 1954). Zudem werden über den Aufbau und die Struktur der Kralle des Hundes im juvenilen und adulten Stadium in der Literatur widersprüchliche Angaben gemacht. Die Kenntnisse über den anatomisch-histologischen Aufbau der Hundekralle im Verlaufe der prae- und perinatalen Entwicklung ist die Grundlage für eine neue Betrachtung und Wertung der Segmenteinteilung der Kralle des Hundes unter Berücksichtigung der Homologiekriterien und im Vergleich zu den entsprechenden Zehenendorganen Nagel, Klaue und Huf.

Des Weiteren ist das Wissen um die Entwicklung der Kralle auch für das Verständnis der pathologischen und sich anschließenden regenerativen oder reparativen Prozesse zu sehen. Wie besonders Studien über den menschlichen Fingernagel, über den Huf und die Klaue zeigen, spielen sich Regenerations- sowie Reparatursprozesse in ähnlicher Weise ab wie die Prozesse, welche schon im Zuge der embryonal-foetalen Entwicklung dieses Organes stattfinden. Veränderungen der behaarten Haut und der Hautmodifikationen treten auch im Zusammenhang mit systemischen Erkrankungen bevorzugt an den Zehenendorganen auf. Damit gewinnen die Zehenendorgane – in diesem Falle die Hundekralle – gerade für den Kliniker an Bedeutung.

Die Befunde werden im Vergleich zu den Literaturangaben unter sieben Schwerpunkten diskutiert. Der erste Diskussionspunkt betrifft die FORM der Hundekralle. Mesoskopische sowie lichtmikroskopische Übersichtsvergrößerungen geben Aufschluss über die foetale Entwicklung der Form der Hundekralle und ermöglichen so den Vergleich mit anderen

²⁸ Wie bereits im Literaturkapitel sowie im Anhang dargestellt, existieren für den Begriff „der Kralle“ unterschiedliche Definitionen. Im folgenden Text wird unter der „Hundekralle“ die Definition der „Kralle im weiteren Sinne“ nach ZIETZSCHMANN (1918) verstanden. Nach dieser Begriffsbestimmung umfasst die Kralle den distalen Zehenknochen, das distale Zehengelenk einschließlich der dazugehörigen Sehnen und Bänder, die das Krallenbein und das distale Zehengelenk umschließende modifizierte Haut (Unterhaut, Lederhaut und Oberhaut) sowie den Krallenwall und den Zehenballen. Damit ist die Kralle des Hundes mit dem Begriff des „Zehenendorganes“ oder „Phalangenendorganes“ gleichzusetzen.

homologen Zehenendorganen, insbesondere der Katzenkrallen. Auskunft über die prae- und perinatale Entwicklung des KRALLENBEINES geben die angewandten histochemischen Untersuchungen. Die Art der Verknöcherung des Krallenbeines sowie deren Verknöcherungsrichtung stellen den zweiten Diskussionspunkt dar. Der dritte sowie der vierte Diskussionspunkt beziehen sich auf die Einteilung der Hundekralle in SEGMENTE. Dabei behandelt der dritte Punkt die Lage der einzelnen Segmente, während unter dem vierten Punkt die prae- und perinatale Entwicklung der Unter-, Leder- und Oberhaut unter Berücksichtigung der speziellen segmentspezifischen Strukturen diskutiert wird. Neben der histochemischen sowie lektinhistochemischen Markierung der Gefäße von Unter- und Lederhaut liefern die licht- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen des Papillarkörpers sowie des Epithels die Hauptbefunde für eine neue Segmenteinteilung der Hundekralle. Im Zuge der Diskussion über die Segmenteinteilung der Hundekralle wird diese in Bezug zu den homologen Zehenendorganen Nagel, Huf und Klaue gesetzt.

Der fünfte Diskussionspunkt umfasst die funktionelle Interpretation der beschriebenen Strukturen der einzelnen Segmentabschnitte. Dabei liegen die Hauptschwerpunkte auf der FUNKTION des „Krallenplattenträgers“, auf der Ausbildung des Papillarkörpers und dessen Funktion sowie auf der Ausbildung und der Funktion der hinfalligen Krallenkapsel.

Überlegungen zur PHYLOGENESE der Hundekralle bilden den sechsten Diskussionspunkt. Der siebte und letzte Punkt dieser Arbeit soll die KLINISCHE BEDEUTUNG der Kenntnisse über die prae- und perinatale Entwicklung der Hundekralle hervorheben. Dabei dienen die dargestellten Befunde über die prae- und perinatalen Entwicklung sowie die anatomisch-histologischen Befunde der Hundekralle im juvenilen und adulten Stadium als Grundlage für deren Betrachtung unter klinisch relevanten Gesichtspunkten.

Für die Untersuchung der prae- und perinatalen Entwicklung der Hundekralle wurden die Krallen von 19 Tieren untersucht. Bei den Tieren handelt es sich um verschiedene Rassen unterschiedlichen Geschlechtes. Sie stammen einerseits aus dem Fundus des embryologischen Laboratoriums des Institutes für Veterinäranatomie der FU Berlin, andererseits aus dem Institut für Veterinärpathologie der Universität Leipzig sowie der FU Berlin. Da die Beschaffung der Hundefoeten und Welpen nicht einfach ist und auf Tierversuche verzichtet werden sollte, ist das Untersuchungsmaterial bezüglich Rasse, Geschlecht und Alter der Tiere sowie bezüglich der Fixierung nicht ganz homogen. Während einige Entwicklungsstadien durch mehrere Foeten vertreten sind, liegt wiederum für andere foetale Stadien nur ein

einziges Exemplar vor. Ein weiteres Problem besteht in der Altersbestimmung der Tiere. Da bei der überwiegenden Anzahl der Foeten das Alter nicht bekannt war, konnte dieses nur über die gemessene Scheitelsteißlänge (SSL) in Verbindung mit Wachstumskurven (siehe NODEN und DE LAHUNTA, 1985) ermittelt werden. Die von NODEN und DE LAHUNTA (1985) veröffentlichte Wachstumskurve berücksichtigt jedoch nicht die Rasse des Hundes. Diese kann aber im Hinblick auf die Größe des Foeten durchaus entscheidend sein, wodurch leichte Abweichungen in der Altersbestimmung auftreten können.

Die Untersuchungsergebnisse lassen jedoch darauf schließen, dass die hier untersuchten Foeten und Welpen durchaus einen repräsentativen Überblick für die Beurteilung einer „kontinuierlichen Entwicklung“ (REMANE et al., 1974) der Hundekralle widerspiegeln, weil die histologischen Präparate bzw. Schnittserien ein kontinuierliches, kohärentes Bild der Entwicklung zeigen.

5.1 DIE PRAE- UND PERINATALE ENTWICKLUNG DER FORM DER HUNDEKRALLE IM VERGLEICH ZU DERJENIGEN VON HOMOLOGEN ZEHENENDORGANEN

Die Form des Zehenendorganes stellt, wie bereits BRAGULLA (1996) erwähnt, ein wichtiges Kriterium für die Zuordnung des Foetus zu einer bestimmten Familie bzw. zu einer bestimmten Art dar. Die Entwicklung des Zehenendorganes steht dabei in engem Zusammenhang mit der Phalangenentwicklung. Mit der Ausformung der einzelnen Zehen differenziert sich auch im Bereich der Zehenspitze das Zehenendorgan. Die ERSTE ANLAGE des Zehenendorganes scheint sich bei den verschiedenen Spezies nicht zu unterscheiden. Wie sowohl für den menschlichen Fingernagel (UNNA, 1876) als auch für die Klaue des Rindes und des Schafes (KUNSIEN, 1882) beschrieben, entwickelt sich zuerst eine abgerundete Anlage des Zehenendorganes im Bereich der Zehenspitze. Aus dieser Anlage differenziert sich die speziesspezifische Form des einzelnen Zehenendorganes. Ab 44 mm SSL ist die Anlage der Hundekralle in Form eines nach distal gerichteten, stumpf zulaufenden Kegels zu sehen. Dieser Kegel ist dorsoventral leicht abgeplattet und erhält daher einen querovalen Durchmesser. Diese Form entspricht in etwa der Beschreibung von ZANDER (1886) und CLARA (1966) für die Gestalt der Fingerspitze samt Fingernagelanlage des Menschen während der achten bis zwölften Embryonalwoche. Für die foetale Katzenkralle beschreibt ERNSBERGER (1998) in dem entsprechenden Entwicklungsstadium erst eine querovale, später eine längsovale Form. Eine derartige Formveränderung tritt auch an der Hundekralle ab 63 mm SSL auf.

Die typische, dorsal konvex gebogene, seitlich abgeplattete SICHELFORM, wie sie für die Kralle adulter Hunde charakteristisch ist, tritt an der foetalen Hundekralle ab einer SSL von 80 mm auf. Dieses stimmt auch mit den zeitlichen Angaben für die Ausbildung der typischen Sichelform der Katzenkralle überein (ERNSBERGER, 1998). Damit entwickelt sich die speziesspezifische Form des Zehenendorganes für Hund und Katze mit Beginn des letzten Drittels der pränatalen Genese. Diese Angaben über die zeitliche Entwicklung der Form der Kralle stehen im Gegensatz zur Entwicklung von Huf (KUNSIEN, 1882; ERNST, 1954; BRAGULLA, 1996) und Klaue (KUNSIEN, 1882), die ihre charakteristische, speziesspezifische Form schon am Ende des ersten Drittels der Trächtigkeit erhalten.

Mit der pränatalen Entwicklung der charakteristischen Krallenform differenziert sich im Bereich des palmaren Krallenabschnittes ein dickes Polster aus toten Zellmassen. Dieser Vorgang ist auch im Verlauf der foetalen Entwicklung der Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) sowie der Rinderklaue (KUNSIEN, 1882) als auch des Pferdehufes (KUNSIEN, 1882; ERNST, 1954; BRAGULLA, 1996) zu beobachten. Die Zellmassen bilden die HINFÄLLIGE KRALLEN-, bzw. HUF- oder KLAUENKAPSEL. Während diese die typische Kontur des Hufes (ERNST, 1954; BRAGULLA, 1996), der Klaue (KUNSIEN, 1882) sowie der Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) besonders im palmaren Bereich bis zur Geburt zunehmend verdecken, wird die charakteristische Form der Hundekralle bis zum Zeitpunkt der Geburt durch die Ausbildung dieser Zellmassen weniger überdeckt.

Das zeitlich unterschiedliche Auftreten der speziellen Form des Zehenendorganes steht wahrscheinlich in engem Zusammenhang mit der Funktion des Zehenendorganes post natum und damit mit der Ausdifferenzierung des Zehenendorganes bis zum Zeitpunkt der Geburt. Hund und Katze sind Nesthocker. Wie die eigenen Befunde über die Entwicklung der Hundekralle und die Studien über die Entwicklung der Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) belegen, ist die Entwicklung der Kralle mit der Geburt noch nicht abgeschlossen. Die Funktion der Kralle der Nesthocker ist in den ersten Lebensstagen noch gering, da die Welpen erst innerhalb der ersten Tage erste Gehversuche starten. Die weitere postnatale Entwicklung der Kralle steht im engen Zusammenhang mit den zukünftigen Funktionen. Mit dem Wachstum des Welpen und der zunehmenden Belastung der Kralle kommt es auch zur Weiterentwicklung des Zehenendorganes. Eine bereits zum Zeitpunkt der Geburt vollständig entwickelte Kralle wäre funktionell nicht sinnvoll, da eine harte und spitze Kralle sowohl die foetalen Fruchthüllen und den Geburtskanal als auch beim Saugakt das Muttertier und die Geschwister durch noch unkontrollierte Bewegungen verletzen könnte. Ganz im Gegensatz dazu müssen Huf und Klaue zum Zeitpunkt der Geburt schon weitgehend vollständig

entwickelt sein, da Pferd und Rind als Fluchttiere schon mit der Geburt das Zehenendorgan vollständig belasten müssen. Eine vollständige Entwicklung des Organes bedingt eine frühzeitige Ausbildung der funktionstüchtigen Form und auch der einzelnen internen Strukturen.

5.2 DIE ENTWICKLUNG DES KRALLENBEINES

Das DRITTE ZEHENGLIED dient als spezifischer GRUNDKÖRPER (ZIETZSCHMANN, 1918) für das Zehenendorgan, so auch für die Hundekralle. Seine Entwicklung steht in engem Zusammenhang mit der Entwicklung der gesamten Gliedmaße (SANZ-EZQUERRO u. TRICKLE, 2002). Dabei ist der genaue Entwicklungsprozess der Gliedmaße einschließlich des Extremitätenskelettes in vielen Punkten noch nicht geklärt.

Wie im Literaturkapitel dargestellt, beruhen die bisherigen Kenntnisse zur Entwicklung des Krallenbeines des Hundes allein auf der Arbeit von SCHAEFFER (1934). Nach den eigenen Untersuchungen beginnt die Entwicklung der Phalanx distalis mit der Kondensation von Mesenchymzellen im Bereich der distalen Zehenspitze. Bis 63 mm SSL hat sich aus diesem Mesenchym ein hyalinknorpeliges Primordium des Krallenbeines sowie ein Gelenkspalt zwischen diesem und der Phalanx media differenziert. Die Ossifikation des hyalinknorpeligen Krallenbeines setzt in dem Entwicklungsabschnitt zwischen 63 mm SSL und 80 mm SSL ein. Diese Befunde stehen im Einklang mit den Darstellungen von SCHAEFFER (1934), der das Einsetzen der Ossifikationsprozesse in der Krallenanlage ab 70 mm SSL beschreibt. Nach den eigenen Befunden entsteht ab 63 mm SSL um den distalen Teil des hyalinknorpeligen Krallenbeines durch direkte perichondrale Ossifikation eine knöcherne Manschette. Diese entspricht der schon mit einer SSL von 55 mm SSL sichtbaren perichondralen Knochenmanschette der langen Röhrenknochen. Die Ossifikation des übrigen hyalinknorpeligen Teiles des Krallenbeines setzt ab zirka 80 mm SSL ein. Sie beginnt am distalen Ende des Krallenbeines, ausgehend von der perichondralen Knochenmanschette und setzt sich proximal fort. Diese Angaben stimmen mit der Darstellung von CARLENS (1927) über die Verknöcherungsausrichtung der Phalanx distalis bei Pferd und Rind überein. Der Autor beschreibt zuerst die Bildung einer knöchernen Endkappe um das Huf- resp. das Klauenbein, der sich die Ossifikation des knorpelpräformierten Hufbein- resp. Klauenbeinteiles anschließt. Die eigenen Befunde ergeben für die foetale Hundekralle, dass sich ab 80 mm SSL der knöcherne, perichondrale Bereich um die Krallenbeinspitze sowie um den palmaren Abschnitt des Krallenbeinfortsatzes vergrößert. Ein unregelmäßiges Geflecht aus kollagenen Fasern

strahlt dabei radiär in das umliegende Bindegewebe aus. Innerhalb dieses Geflechtes liegen verknöcherte Trabekel sowie zahlreiche, von den Fasern eingeschlossene Gefäße. Es entsteht ein Geflechtknochen. Die Gefäße innerhalb des distopalmaren Teiles dieses Geflechtknochens sind Gefäße des praesumptiven subkutanen Gefäßnetzes. Der im distopalmaren Krallenbeinabschnitt auftretende verknöcherte Abschnitt entsteht nach den eigenen Befunden unabhängig von der perichondralen Knochenmanschette. Im weiteren Verlauf der Krallenbeinentwicklung verknöchert der bindegewebige Abschnitt im distalen sowie lateropalmaren Bereich um den Krallenbeinfortsatz herum. Die im äußeren Teil des Krallenbeinfortsatzes eingeschlossenen Gefäße sind ursprünglich die subkutanen Gefäße des Wand- und Sohlensegmentes und werden mit zunehmender Entwicklung des Krallenbeines im Canalis solearis unter Bildung des sogenannten Arcus terminalis eingemauert. Diese Befunde lassen darauf schließen, dass der apikale sowie der distopalmare Bereich des Krallenbeines ab zirka 80 mm SSL durch direkte Ossifikation gebildet wird, unabhängig von der Entwicklung des aus dem hyalinknorpeligen Krallenbein entstandenen Teiles des Krallenbeines. Diese Entwicklung ähnelt derjenigen des Hufbeinfortsatzes des Pferdes, welcher zumindest partiell aus einer eigenständigen hyalinknorpeligen Anlage (gemeinsam mit der Hufknorpelanlage) entsteht (BRAGULLA, 1999).

Im Gegensatz zur PHALANX MEDIA sowie PHALANX PROXIMALIS verknöchert das hyalinknorpelige Krallenbein in nur distoproximaler Richtung von der Krallenbeinspitze zur Krallenbeinbasis. Die Verknöcherungsrichtung des Krallenbeines des Hundes entspricht damit der Verknöcherungsrichtung der Phalanx distalis der homologen Zehenendorgane von Katze (ERNSBERGER, 1998), Pferd (CARLENS, 1927; BRAGULLA, 1996) und Rind (CARLENS, 1927).

Während das Hufbein des Pferdes sowie das Klauenbein des Rindes mit der Geburt des Tieres bis auf die einzige proximale Wachstumsfuge schon vollständig verknöchert sind, ist das Krallenbein des Hundes zum Zeitpunkt der Geburt erst im Bereich der distalen zwei Drittel verknöchert. Die Krallenbeinbasis besteht noch vollständig aus hyalinem Knorpel. Mit der noch nicht vollzogenen Verknöcherung der Krallenbeinbasis fehlt auch noch die Ausbildung der knöchernen Krallenleiste (Crista unguicularis). Wie die eigenen Befunde zeigen, ist eine knöcherne Krallenleiste erst an der Hundekralle im adulten Stadium ausgebildet. Dieses entspricht auch den Befunden von SCHÄFFER (1934), der an der Hundekralle erst mit 255 Tagen post natum einen ein Millimeter tiefen knöchernen Krallenfalz beschreibt. Daraus ist zu schließen, dass die Ausbildung der Krallenleiste in einem engen funktionellen Zusammenhang mit der post natum einsetzenden Belastung der Kralle steht. Mit zunehmendem Alter des

Tieres nimmt die Belastung in diesem Krallenabschnitt zu. Um eine optimale Funktion erfüllen zu können, braucht die Krallenplatte im proximalen Krallenabschnitt ein Widerlager. Dieses könnte durch die Verknöcherung der subkutanen Strukturen im Saum- und Kronsegment erreicht werden, wodurch sich die Ausbildung der KNÖCHERNEN KRALLENLEISTE erklären ließe. Die knöcherne Krallenleiste ist demzufolge, wie im Befundteil auch für das Wand- und das Sohlensegment beschrieben, als (partielle) Verknöcherung der Subkutis anzusehen. Neben der Belastung spielen für die Ausbildung der Krallenleiste wahrscheinlich die Rasse, das Alter sowie das Gewicht des Tieres eine entscheidende Rolle. Diese funktionellen Zusammenhänge zwischen der Belastung und dem Aufbau der Kralle des adulten Hundes müssten weiter geklärt werden. Ähnliche Befunde über die späte Verknöcherung des Krallenbeines sowie die Ausbildung einer Krallenleiste post natum werden auch von ERNSBERGER (1998) an der sich entwickelnden Katzenkralle beschrieben. Die Ursache für die spät einsetzende Verknöcherung der Krallen von Nesthockern Hund und Katze, vergleicht man sie mit der viel früher abgeschlossenen Verknöcherung des dritten Zehengliedes im Huf des Pferdes resp. in der Klaue des Rindes, liegt in der Funktion des jeweiligen Zehenendorganes. Während der Nestflüchter das Zehenendorgan mit dem Zeitpunkt der Geburt vollständig belasten muss, ist die Belastung der Kralle des Nesthockers in den ersten Tagen nach der Geburt gering. Dabei spielt wohl auch das vergleichsweise geringe Geburtsgewicht eines Hunde- bzw. Katzenwelpen im Vergleich zum Körpergewicht eines neugeborenen Fohlen resp. Kalbes eine Rolle.

Als FAZIT der Entwicklung des Krallenbeines des Hundes lässt sich ziehen, dass dieser Knochen aus mehreren Abschnitten entsteht und diese Bildung in einem engen funktionellen Zusammenhang mit der Differenzierung der Unterhaut steht. Einhergehend mit den Literaturangaben ist anhand der eigenen Befunde der prae- und perinatalen Entwicklung der Hundekralle der unterschiedliche Entwicklungszeitpunkt der Phalanx distalis in dem Zehenendorganen des Nestflüchters sowie des Nesthockers zu bestätigen.

5.3 EINTEILUNG DER HUNDEKRALLE IN SEGMENTE UND DEREN VERGLEICH ZU HOMOLOGEN ZEHENENDORGANEN

Ein Ziel dieser Arbeit besteht zum einen darin, übereinstimmende Strukturen an der Kralle des Hundes verschiedener Individuen wiederzuerkennen und entsprechend zu benennen, sowie zum anderen, diese gemeinsamen bzw. übereinstimmenden Strukturen bei Individuen anderer Arten herauszufinden und diese mit den Strukturen der Kralle zu HOMOLOGISIEREN

und dann auch zu HOMONOMIEREN (PREUSS, 1957). Als Basis dafür dienen entsprechend die Befunde zur prae- und perinatalen Entwicklung des Organes.

Eine Untergliederung der adulten Fleischfresserkralle in einzelne Krallensegmente resp. -teile wurde schon von BOAS (1894) und ZIETZSCHMANN (1918) vorgenommen. Die Autoren haben die Begriffe Krallenplatte, Krallenwall, Krallensohle, Krone und Ballen für die Beschreibung der einzelnen Krallenabschnitte eingeführt. In der folgenden Zeit sind jedoch die Begriffe für die Unterteilung der Kralle nicht einheitlich verwendet worden. Dabei wurde sehr wohl erkannt, dass die einzelnen Krallenabschnitte durch Modifikationen der Epidermis und der Dermis hervorgerufen werden, jedoch wurde die Tatsache vernachlässigt, dass sich z. B. das Kronhorn über das Wandhorn schiebt. Dadurch lässt sich die Lagebeziehung der einzelnen Krallenabschnitte zueinander nicht exakt bestimmen. Eine Einteilung der Kralle in spezifische Segmente kann nur aufgrund charakteristischer Modifikationen der drei Hautschichten sinnvoll sein. Außer einer definierten Lage und Ausdehnung der einzelnen Segmente wird daraufhin ein Vergleich einzelner Segmente mit denjenigen in homologen Zehenendorganen ermöglicht. Dabei dient eine exakte Definition der Segmente sowohl einer leichteren vergleichend anatomischen Beurteilung als auch einer eindeutigen Lokalisation von pathologischen Veränderungen (MÜLLING, 1993).

Die SEGMENTEINTEILUNG eines Zehenendorganes, sei es Kralle, Klaue oder Huf, muss unter Betrachtung der Homologie-/Homonomiekriterien erfolgen, wie sie z. B. von PREUSS (1957) oder REMANE et al. (1974) definiert wurden. Zur praktischen Homologisierung nennt PREUSS (1957) die Notwendigkeit der Einführung von Homologiekriterien. Diese Vergleichs- oder Unterscheidungsmerkmale, wie PREUSS (1957) sie nennt, sind für jedes Organ jeweils andere, sei es grundsätzlich oder der Reihenfolge nach. Diese Reihenfolge ergibt sich aus der WERTUNG/WICHTUNG der verschiedenen strukturellen Merkmale, wodurch die Homologiekriterien wiederum in Leitkriterien und Nebenkriterien eingeteilt werden können. Die Wichtung und davon abgeleitet die Reihenfolge der Homologiekriterien ergibt sich erst aus dem konkreten Vergleich spezifischer Strukturen und darf nicht als ein feststehendes Wertesystem betrachtet werden, sondern dieses kann durch eine erneute Untersuchung, insbesondere durch die Untersuchung der Phylo- und Ontogenese eines Organes, auch eine Abänderung der Bewertung dieser Homologiekriterien nach sich ziehen.

Für die Segmenteinteilung der Hundekralle wurden bisher folgende Kriterien herangezogen:

1. Ausformung der dermo-epidermalen Oberflächenkonfiguration (primäres Homologiekriterium)
2. Qualität und Quantität des Keratinisierungs- und Verhornungsmodus der Epidermis (sekundäres Homologiekriterium)
3. Ausprägung einer Subkutis (tertiäres Homologiekriterium)

In der Literatur bestehen Uneinigheiten über die Wahl der Homologiekriterien und damit ihrer Wertung und Wichtung. Des Weiteren wird die Ausprägung einer Subkutis in den Segmenten der Kralle beim Hund, wenn überhaupt, dann nur am Rande in der Literatur erwähnt. Neben der allgemeinen Frage nach der Existenz einer Unterhaut in der Hundekralle, gibt es insbesondere Uneinigheiten über die Zugehörigkeit des Rückenwulstes zum Wand- oder zum Kronsegment, über die Ausdehnung des Saumsegmentes sowie über die Einordnung des Zehenballens als eine proximal verlagerte separate Struktur oder als integriertes Ballensegment. Dabei liegt allen Arbeiten bisher nur die Beurteilung der Kralle adulter Hunde zugrunde. Die prae- sowie perinatale Entwicklung der Kralle sowie ihrer einzelnen Segmentabschnitte wurde bisher für eine Segmenteinteilung nicht berücksichtigt.

Aufgrund der unterschiedlichen Literaturangaben zur Segmenteinteilung der Hundekralle lässt sich schlussfolgern, dass für diese Einteilung bisher noch keine optimale Auswahl der Homologiekriterien gefunden wurde.

Die Ontogenese zeigt die Ausbildung spezifischer Strukturen in lokaler und zeitlicher Reihenfolge innerhalb eines Organes auf, woraus ausschlaggebende Kriterien für die Homologisierung bzw. für die Wichtung der gewählten Homologiekriterien abzuleiten sind (REMANE et al., 1974).

Während entsprechende Arbeiten über die Entwicklung der homologen Zehenendorgane Nagel (UNNA, 1876; ZANDER, 1884; ZAIAS, 1963; CLARA, 1966; HASHIMOTO, 1966), Klaue (KUNSIEN, 1882; DIRKS, 1985; BRAGULLA et al., 1997) und Huf (KUNSIEN, 1882; ERNST, 1954; BRAGULLA, 1996) bereits vorliegen, gibt es über die Entwicklung der Fleischfresserkralle bisher nur die Arbeiten von KATO (1977) und ERNSBERGER (1998) über die Katzenkrallen. Wie bereits SIEDAMGROTZKY (1870) sowie BOAS (1881) feststellen, und ERNSBERGER (1998) in ihrer Arbeit über die Ontogenese der Katzenkrallen bestätigt, liegen jedoch gravierende funktionelle und daher auch strukturelle Unterschiede zwischen der Hunde- und der Katzenkrallen vor. Eine einheitliche Zusammenfassung dieser

beiden Krallenformen als „Fleischfresserkralle“ ist demzufolge für eine Homologisierung sowie deren Segmenteinteilung unzulässig. In diesem Zusammenhang ist auch die unterschiedliche Funktion der Katzenkralle im Vergleich zur Hundekralle zu sehen. Während die beim Laufen eingezogene, scharfkantige Katzenkralle nur zum Klettern und zum Festhalten der Beute ausgefahren wird (ZIETZSCHMANN, 1918; WÜNSCHE u. PREUSS 1972), stumpft die nicht einziehbare Kralle des Hundes beim Laufen ab (HABERMEHL, 1996).

Die Befunde über die Ontogenese der Hundekralle ermöglichen nun für diese Kralle eine NEUBEWERTUNG DER HOMOLOGIEKRITERIEN und eine daraus abgeleitete Segmenteinteilung.

Diese aus der prae- und perinatalen Entwicklung abgeleitete Neubewertung ist für die Kralle notwendig, da sich die bisherigen, aus dem Aufbau der Kralle adulter Hunde abgeleiteten Vergleichskriterien in der alten Reihenfolge nicht auf die sich entwickelnde Kralle übertragen lassen. Für die Ontogenese der Hundekralle sind sowohl die Ausformung der dermo-epidermalen Oberflächenkonfiguration, als auch die Qualität und Quantität der Hornproduktion als Kriterien für eine Segmenteinteilung nicht anwendbar, da die Ausdifferenzierung dieser Strukturen an der Hundekralle weitgehend funktionell bedingt ist und daher erst in den späten Entwicklungsstufen auftritt. Darüber hinaus fehlen bisher in der Literatur Angaben zur Ausbildung bzw. Abgrenzung und Modifikation von Dermis und Subkutis, die als Homologiekriterien für eine Segmenteinteilung der Hundekralle nötig sind.

Aus den eigenen Befunden zur Entwicklung der Hundekralle ergibt sich für diese nun folgende neue Reihenfolge in der Wertung der Homologiekriterien:

1. Entwicklung, Ausprägung und Abgrenzung von PRAESUMPTIVER SUBKUTIS und DERMIS anhand der Ausbildung SPEZIFISCHER GEFÄßSTRUKTUREN (primäres Homologiekriterium)
2. Entwicklung des SEGMENTSPEZIFISCHEN PAPILLARKÖRPERS (sekundäres Homologiekriterium)
3. Entwicklung der SEGMENTSPEZIFISCHEN EPIDERMIS unter Berücksichtigung des Verhornungsmodus und der Hornproduktion (tertiäres Homologiekriterium)

Diese neue Wertung der Homologiekriterien ergibt sich aus dem zeitlichen Auftreten prägnanter Strukturen während der Organogenese der Hundekralle. Neben der Ausbildung des Krallenbeines kommt es im Bereich der Hundekralle schon sehr früh, noch vor der Ausbildung weiterer prägnanter Strukturen im Bereich der dermo-epidermalen Grenzfläche

sowie der Epidermis, zur Ausdifferenzierung zweier Gefäßnetze innerhalb des noch undifferenzierten Bindegewebes. Diese treten in allen Krallenabschnitten auf, während das Bindegewebe noch weitgehend unstrukturiert ist. Eine Abgrenzung von praesumptiver Unterhaut und praesumptiver Lederhaut aufgrund spezifischer Merkmale – wie Faser- und Zellgehalt – des Bindegewebes, wie sie zur Abgrenzung von Leder- und Unterhaut im Zehenendorgan adulter Individuen herangezogen werden, ist während der ersten Entwicklungsphase der Krallen nicht möglich. Durch die Ausbildung und Lage der beiden Gefäßnetze lässt sich dennoch eine Abgrenzung der beiden bindegewebigen Strukturen vornehmen. Wie die vorliegenden Befunde zur Entwicklung der Kralle verdeutlichen, ist der tiefere Gefäßplexus der praesumptive subkutane Gefäßplexus, während der oberflächlichere Gefäßplexus das praesumptive tiefe dermale Gefäßnetz bildet. In gleicher Weise wurde bereits von einigen Autoren für die unmodifizierte Haut beschrieben (LOEFFLER, 1966; YEN u. BRAVERMANN, 1976; KIRSTENSEN, 1976), dass der tiefe dermale Gefäßplexus die Grenze zur Unterhaut definiert, während der Bereich zwischen subkutanem Gefäßplexus und tiefem dermalen Gefäßnetz die Unterhaut eingrenzt. Da es sich bei der Hundekralle um eine Modifikation der Haut handelt, ist es durchaus gerechtfertigt, diese Definition auf die Hundekralle zu übertragen. Somit ergibt sich als Konsequenz für die Ausprägung der beiden Gefäßplexus an der Hundekralle, dass hier schon im frühen foetalen Entwicklungsstadium eine Differenzierung zwischen der zukünftigen Leder- und praesumptiven Unterhaut vorgenommen werden kann. Die weitere Differenzierung des Bindegewebes innerhalb der jeweiligen Hautabschnitte ist größtenteils funktionell gekoppelt und vollzieht sich erst post natum aufgrund der einsetzenden und steigenden Belastung der Kralle. Dabei kann sich das mesenchymale Bindegewebe sowohl in der Lederhaut als auch in der Unterhaut funktionell in ein lockeres oder straffes Bindegewebe differenzieren oder es kann sogar in bestimmten Bereichen der Unterhaut vollständig verknöchern.

Es ist demzufolge aus vergleichend-anatomischer Sicht ungenau, die Existenz oder das Fehlen einer Unterhaut als Homologiekriterium für die Segmenteinteilung der Kralle heranzuziehen, da in allen Krallensegmenten eine Unterhaut angelegt wird. Allein die weitere Ausdifferenzierung der Unter- sowie der Lederhaut unterscheidet sich in den einzelnen Segmentabschnitten.

Die Ausdifferenzierung einer Unterhaut aus lockerem, faserarmen Bindegewebe als ein Homologiekriterium wurde bereits an Arbeiten über den Pferdehuf (ERNST, 1954; BRAGULLA, 1996) sowie über die adulte Rinderklaue (MÜLLING, 1993; WESTERFELD, 2003) herangezogen. In keiner dieser Untersuchungen wurde jedoch die Ausprägung der

Gefäßstrukturen als Abgrenzungskriterium zu Grunde gelegt, vielmehr berief man sich nur auf die Ausprägung der für eine Unterhaut in der unmodifizierten behaarten Haut typischen (lockeres, faserarmes Bindegewebe) bindegewebigen Strukturen²⁹.

Aus den neu definierten Homologiekriterien werden für die Hundekralle folgende Segment abgeleitet: SAUM-, KRON-, WAND-, SOHLEN- und BALLENSEGMENT. Die Lage der einzelnen Segmente wird wie folgt definiert:

SAUMSEGMENT

Das Saumsegment der perinatalen Hundekralle liegt innerhalb des äußeren Blattes der Krallentasche, bzw. des inneren Teiles des Krallenwalles. An der perinatalen Hundekralle ist es proximal durch ein ausgeprägtes subkutanes Gefäßnetz gekennzeichnet. Wie die eigenen Untersuchungen der adulten Hundekralle zeigen, verschwindet dieses mit der Ausbildung des knöchernen Krallenfalzes. Distal wird das Saumsegment von behaarter Haut begrenzt. Der Abschnitt der behaarten Haut schlägt sich am freien Rand proximal um und bildet den äußeren Bereich des Krallenwalles. Während der ersten Entwicklungsphase der Hundekralle bildet das Saumsegment noch die Umschlagstelle am freien Rand der Krallentasche, wird aber mit der fortlaufenden Entwicklung vollends auf den Innenabschnitt des Krallenwalles verlagert. Proximal, noch vor Erreichen des Taschengrundes, geht das Saumsegment in das Kronsegment über. Laut SEIDEL (1992) für die adulte Hundekralle und ERNSBERGER (1998) für die Katzenkralle reicht das Saumsegment bis in den Krallentaschengrund hinein. Legt man jedoch die neu bewerteten Homologiekriterien zugrunde, lässt sich dieser Befund allerdings nicht bestätigen. Lateral liegt der Saum als ein palmar schmal zulaufendes „Band“ im äußeren Blatt der Krallentasche. Lateropalmar bildet der palmare Krallentaschengrund den Übergang in das proximopalmar sich anschließende Ballensegment sowie in das weiter distal liegende Kronsegment. In gleicher Weise geht das palmar schmaler werdende Saumsegment in das Ballensegment des zur Kralle homologen Pferdehufes über.

Als Besonderheit findet sich an der Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) eine zweite behaarte Hautfalte, welche beim Ausfahren der Kralle verstreicht. Diese zusätzliche Hautfalte kommt bei der nicht einziehbaren Hundekralle nicht vor.

²⁹ Herkömmlicherweise wird die Unterhaut als ein lockeres, faserarmes Bindegewebe verstanden; wird im folgenden Text der Begriff der „herkömmlichen Unterhaut“ verwendet, so ist unter diesem ein lockeres, faserarmes Bindegewebe zu verstehen.

KRONSEGMENT

Das Kronsegment der Hundekralle beginnt im Perinatalstadium noch im Bereich des äußeren Blattes der Krallentasche. Im Krallentaschengrund schlägt sich dieses nach innen bzw. distal um und reicht in Form des Rückenwulstes fast bis zur Krallenspitze. In der Nähe der Krallenspitze geht der Rückenwulst in den Zehenrückenteil des Wandsegmentes über. Der Übergang in das Wandsegment ist durch den Eintritt der subkutanen Gefäße in den Knochenkanal (Canalis solaris) des Krallenbeinfortsatzes gekennzeichnet. Durch die Ausprägung der beiden Gefäßplexus im bindegewebigen Rückenwulst ist dieser zum Kronsegment und nicht - wie von SEIDEL (1992) zugeordnet - zum Wandsegment zu rechnen. Damit ist das Kronsegment der Hundekralle durch eine nicht verknöcherte Unterhaut gekennzeichnet. Die Beurteilung des bindegewebigen Aufbaues und das daraus abgeleitete Vorhandensein einer Unterhaut ist auch schon von früheren Autoren als Kriterium herangezogen worden. Dabei stützen sich die Definitionen für die Ausbildung einer Unterhaut jedoch nicht auf die Ausbildung der Gefäßstrukturen, sondern lediglich auf den Faser- und Zellgehalt der bindegewebigen Strukturen. Eine solche Abgrenzung des Bindegewebes ist sehr ungenau und führte dazu, dass ein Grossteil der Autoren das Fehlen der Unterhaut in spezifischen Krallenabschnitten und auch im Kronsegment feststellten. Doch schon ERNSBERGER (1998) beschreibt für die Katzenkralle, als eine Form der Fleischfresserkralle, im proximalen Teil des Rückenwulstes eine Unterhaut im herkömmlichen Sinne und zählt diesen Bereich des Rückenwulstes der Katzenkralle deshalb zum Kronsegment. Für den distalen Rückenwulstabschnitt der Katzenkralle beschreibt die Autorin hingegen keine Subkutis, weshalb sie diesen Teil dem Wandsegment zurechnet. Da ERNSBERGER (1998) allein die Ausbildung eines lockeren, faserarmen Bindegewebes für die Definition einer Unterhaut heranzieht, wäre auch für diese Spezies eine weitergehende Betrachtung des Rückenwulstes unter dem Gesichtspunkt der Ausprägung der Gefäßstrukturen nötig, denn auch die Unterhaut des Rückenwulstes der Hundekralle besteht perinatal durchaus nicht in allen Bereichen aus einem lockeren Bindegewebe, sondern weist gerade in den distalen Abschnitten eine straffe, zellarme Struktur auf.

Als KONSEQUENZ der neu gewählten resp. gewichteten Homologiekriterien ergibt sich nun, dass der Rückenwulst der Hundekralle mit der nach distal aus der Nageltasche halbmondförmig hervorragenden Lunula (ZOOK, 2000), bzw. der distalen Matrix (HASHIMOTO, 1971) des menschlichen Fingernagels gleichzusetzen ist.

Im proximalen Krallenabschnitt reicht das Kronsegment lateropalmar an das Sohlensegment heran. Weiter distal beschränkt sich das Kronsegment nur noch auf den Rückenteil der Kralle. Damit beschreibt der Übergang des proximalen Teiles in den distalen Teil des Kronsegmentes einen konkaven, von proximopalmar nach dorsodistal ziehenden Bogen.

Der proximale Kronsegmentabschnitt ist entsprechend seiner Ausdehnung innerhalb der Krallentasche in einen äußeren proximalen Teil des Kronsegmentes und einen inneren proximalen Teil des Kronsegmentes zu gliedern. Beide Teile liegen vollständig innerhalb der Krallentasche. Der äußere proximale Teil des Kronsegmentes liegt dorsolateral innerhalb des äußeren Blattes der Krallentasche und schlägt sich im Krallentaschengrund in den inneren proximalen Teil des Kronsegmentes um. Der innere proximale Teil des Kronsegmentes grenzt palmar an das Sohlensegment, verläuft lateral in einem leicht konkav geschwungenem Bogen nach dorsal und bildet dort einen fließenden Übergang zum distalen Teil des Kronsegmentes bzw. des Rückenwulstes. Dieser Rückenwulst beginnt noch innerhalb der Krallentasche und setzt sich als im Querschnitt pilzförmige bindegewebige Erhebung im Bereich des Krallentrückens bis kurz vor die Krallenspitze fort. Vom lateralen Teil des Wandsegmentes ist der bindegewebige Rückenwulst durch eine konkave Einkerbung abgesetzt. Diese beginnt proximal als seichte Rinne und gewinnt nach distal an Tiefe, wo sie im Bereich der Krallenspitze dann seicht auslaufend verschwindet. Die transversal konvexe Krümmung des Rückenwulstes ist im proximalen Krallendrittel am deutlichsten ausgeprägt, in den distalen zwei Dritteln nimmt diese konvexe Krümmung etwas ab.

Der hier an der Hundekralle als proximaler Teil des Kronsegmentes bezeichnete Bereich entspricht wiederum nach Lage und Ausdehnung dem proximalen Teil des Kronsegmentes am menschlichen Fingernagel. Die von HASHIMOTO (1971 a) beschriebene proximodorsale sowie proximoapikale Matrix des Fingernagels stimmt demzufolge mit dem äußeren proximalen Teil des Kronsegmentes überein, während der innere Teil des Kronsegmentes der proximoventralen Matrix des Fingernagels entspricht. Der Rückenwulst der Hundekralle bildet dann in Homologie zum Fingernagel die Grundlage für die distale Matrix des Kronsegmentes.

WANDSEGMENT

Das Wandsegment der Hundekralle ist im Perinatalstadium primär durch eine verknöcherte Subkutis gekennzeichnet. Diese Subkutis des Wandsegmentes wird durch den verknöcherten Bereich zwischen dem im Canalis solearis liegenden Arcus terminalis, dem Periost in diesem

Abschnitt sowie einem straffen bindegewebigen Bezirk zwischen dem tiefen dermalen Gefäßplexus und dem Periost repräsentiert. Damit ergeben sich für das Wandsegment zwei laterale Teile sowie ein dorsodistaler Abschnitt, welcher entsprechend der Benennung an Huf und Klaue auch als Zehenrückenteil bezeichnet werden kann. Die lateralen Teile des Wandsegmentes, in Homologie/Homonomie zu Klaue und Huf als Seitenteile bezeichnet, schließen sich distal dem proximalen Teil des Kronsegmentes an und reichen laterodistal bis an die Krallenspitze heran. Dorsodistal und proximolateral bildet der Rückenwulst des Kronsegmentes die Begrenzung zum Wandsegment. Dabei kennzeichnet der Grund der bindegewebigen lateralen konkaven Einbuchtung zwischen Rückenwulst und Wandsegment den Übergang dieser beiden Segmente. An den exemplarisch untersuchten adulten Hundekralen haben sich die Verhältnisse des Rückenwulstes etwas geändert. Da hier häufig kein „Wulst“ mehr besteht, gehen der Zehenrückenteil sowie die Seitenteile des Wandsegmentes ohne eine deutliche Abgrenzung ineinander über. Für die Kralle des adulten Hundes stellen dann die Form der dermo-epidermalen Oberfläche sowie die Hornbildungsrate ein signifikantes Unterscheidungsmerkmal zwischen beiden Segmenten dar. Die Beurteilung der subkutanen Strukturen ist an den untersuchten adulten Hundekralen nicht möglich. Eine Folgeuntersuchung zum Aufbau der Subkutis und der Gefäßplexus in der Kralle adulter Hunde ist deshalb nötig.

Abgesehen von der neuen Zuordnung des Rückenwulstes zum Kronsegment stimmt die Lage und Ausdehnung des Wandsegmentes mit den bisherigen Beschreibungen von SEIDEL (1992) zum Wandsegment der Hundekralle – sowie von ERNSBERGER (1998) über das Wandsegment der Katzenkralle – überein.

SOHLENSEGMENT

Das Sohlensegment beginnt proximal mit dem Eintritt der Zehenendarterie in das Foramen soleare des Krallenbeines. Die Zehenendarterie wird damit zum Arcus terminalis. Dieser entsteht aus den ursprünglichen Unterhautgefäßen des Sohlen- und Wandsegmentes und ist erst durch die Einmauerung der Gefäße in das knöcherne Krallenbein (Canalis solearis) als Arcus anzusprechen. Die desmale resp. perichondrale Verknöcherung um die subkutanen Gefäße herum beginnt in der Kralle eines Hundefoetus von 63 mm SSL und ist in derjenigen eines Foetus von 80 mm SSL vollendet.

Lateral und distal wird das Sohlensegment vom Wandsegment eingerahmt. Proximal setzt es sich lateral in den proximalen Teil des Kronsegmentes, proximopalmar in den Zehenballen,

bzw. in das Ballensegment fort. Damit liegt das Sohlensegment palmar auf der gesamten Längsachse der Kralle. Seine latero-laterale Ausdehnung nimmt von distal nach proximal ab und beschränkt sich am Übergang in das Kronsegment nur noch auf einen ganz schmalen Streifen. Die Ausprägung des Sohlensegmentes der perinatalen Hundekralle stimmt mit der von SEIDEL (1992) dargestellten Ausdehnung an der adulten Hundekralle, sowie der von ERNSBERGER (1998) beschriebenen Ausdehnung der Katzenkralle überein. Weder SEIDEL (1992) noch ERNSBERGER (1998) leiten dabei eine detaillierte Darstellung der proximalen Abgrenzung des Sohlensegmentes ein. Diese ist für das Sohlensegment an Huf und Klaue genauer dargestellt. Als Kriterien für die Lage des Sohlensegmentes der Rinderklaue beschreibt MÜLLING (1993) in Übereinstimmung mit WILKENS (1963) und FÜRST (1992) neben der Ausbildung der Oberflächenkonfiguration der Leder- und Oberhaut als weiteres Hauptkriterium das „Fehlen“ einer Subkutis. Gleiches gilt für die Ausdehnung des Sohlensegmentes des Pferdehufes (BUDRAS, 1999). Das „Fehlen“ der Unterhaut resultiert aus der knöchernen Struktur dieser Unterhaut und stimmt damit wiederum mit dem Hauptkriterium des Sohlensegmentes der Hundekralle überein. MÜLLING (1993) stellt dabei an der Rinderklaue weiter fest, dass die Reichweite dieses „Fehlens“ der Subkutis in diesem Bereich mit der Ausdehnung der spezifischen dermo-epidermalen Oberflächenkonfiguration übereinstimmt, wodurch eine Aufwertung dieses Homologiekriteriums auch für die Hundekralle als homologes Zehenendorgan noch unterstrichen werden kann.

BALLENSEGMENT

Das Ballensegment ist durch ein deutlich ausgeprägtes Subkutispolster mit den für den Zehenballen der Fleischfresser typischen ekkrinen Schweißdrüsen gekennzeichnet. Im Gegensatz zur Auffassung von SEIDEL (1992) kann der Zehenballen aufgrund seiner perinatalen Ausbildung durchaus als Ballensegment in die Kralle eingeordnet werden. Dieses ermöglicht wiederum die Gleichsetzung der Begriffe Zehenendorgan und „Kralle im weiteren Sinne“, wie sie auch für die homologen Zehenendorgane Huf und Klaue (ZIETZSCHMANN, 1918 u. 1943; HABERMEHL, 1996) vorgenommen wird. Dabei ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass ein großer Bereich des Zehenballens proximopalmar liegt und damit nicht mehr direkt an der Krallentütenausbildung beteiligt ist bzw. dass er von der Krallentüte eingeschlossen wird. Neben der Ausprägung des subkutanen Gefäßnetzes, welches im perinatalen Zeitraum der Kralle noch bis unter den Krallenbeinfortsatz reicht und damit auch noch von der Krallentüte umfasst wird, befinden sich weiterhin in diesem Krallenabschnitt die

für den Zehenballen typischen Zehenballendrüsen. Wie die exemplarisch untersuchten Krallen adulter Hunde jedoch zeigen, tritt in der juvenilen bzw. adulten Phase eine Verlagerung der Drüsen bzw. der gesamten modifizierten Zehenballenhaut nach palmar ein. Diese Verlagerung kann mit der zunehmenden Gewichtsbelastung des Zehenballens beim Übergang von der plantigraden Fußung des Welpen zur digitigraden Fußung des adulten Hundes im Zusammenhang stehen.

Der Zehenballen beginnt palmar an der Krallenbasis als Fortsetzung des Sohlensegmentes. Als palmare Fortsetzung der die Kralle dorsal und lateral umschließenden Krallentasche setzt sich der zum Sohlensegment gewandte Teil des Ballensegmentes distal fort. Hervorzuheben ist in diesem Zehenballenabschnitt an der perinatalen Kralle die Epidermis, die sich im proximalen Umschlagsbereich mit der Epidermis der gegenüberliegenden Seite verbindet, so einen Teil des proximopalmaren Abschnittes der Krallentüte bildet und in Homologie zu Klaue und Huf mit dem Saumsegment der Kralle in Verbindung steht. Am distalen freien Ende schlägt sich das Ballensegment in einem konvexen Bogen palmar um und dehnt sich, einen Halbkreis beschreibend, weiter proximal aus. Dort reicht es bis über die Höhe des distalen Zehengelenkes hinweg. Proximopalar stellt der Übergang in die äußere behaarte Haut die proximale Begrenzung des Ballensegmentes dar, dorsolateral geht der Zehenballen in die Krallentasche bzw. den Krallenwall über. Bis eine Woche post natum bedeckt der Zehenballen mit seiner der Kralle zugewandten Seite etwa die proximale Hälfte des Sohlensegmentes.

Da der Zehenballen in den Literaturangaben nur bedingt zur Kralle gerechnet wird, sind die Angaben über den Aufbau des Zehenballens in der Literatur zur Kralle meist unvollständig. Während Literaturangaben über die peri- und postnatale Entwicklung des Katzenballens (KARMANN, 2001) vorliegen, ist dem Zehenballen des Hundes bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden. Neben der Beschreibung des Subkutispolsters und der ekkrinen Schweißdrüsen liegt das Hauptaugenmerk der Ausführungen zum Aufbau des Zehenballens auf der Darstellung des ausgeprägten Papillarkörpers sowie der sich nach dem weichen Verhornungsmodus differenzierenden Epidermis.

5.4 AUFBAU DER UNTERHAUT, DES PAPILLARKÖRPER SOWIE DER OBERHAUT DER HUNDEKRALLE IM PRAE- UND PERINATALEN STADIUM

Nach der allgemeinen Darstellung der Lage und Ausdehnung der einzelnen Segmente der Hundekralle im perinatalen Entwicklungsstadium sollen im Folgenden die einzelnen

Modifikationen der Hautabschnitte innerhalb der Krallensegmente mit den Literaturangaben verglichen werden. Die darauf folgenden Abschnitte diskutieren die Funktionen der Hautmodifikationen im Vergleich zu Umgestaltungen entsprechender Segmentabschnitte homologer Zehenendorgane.

AUSBILDUNG DER UNTERHAUT DER HUNDEKRALLE IM PRAE- UND PERINATALEN STADIUM

Bisher war eine Abgrenzung der Unterhaut in der Hundekralle nicht möglich, da diese allein aufgrund des Auftretens bestimmter Komponenten, wie Fasern, Zellen und ungeformte Interzellulärsubstanz, erfolgte, eine genaue Definition dieser Hautschicht jedoch fehlte. In dem noch UNDIFFERENZIIERTEN MESENCHYMALEN GEWEBE der foetalen Hundekralle sind die genannten Beurteilungskriterien – Fasergehalt, Zellgehalt, ungeformte Interzellulärsubstanz – allerdings nur bedingt anwendbar. Die frühe und konstante Ausbildung ZWEIER GEFÄßPLEXUS ermöglicht jedoch eine Beurteilung und Zuordnung der unterschiedlichen bindegewebigen Hautschichten. Die Befunde zum Aufbau und zur Entwicklung der foetalen Hundekralle lassen den Schluss zu, dass die praesumtive Unterhaut das zwischen den beiden bereits ausgebildeten Hautgefäßplexus gelegene Bindegewebe umfasst. Dabei differenziert sich der tiefere Gefäßplexus zum späteren UNTERHAUTGEFÄßNETZ, während der oberflächlichere Gefäßplexus den zukünftigen TIEFEN DERMALEN GEFÄßPLEXUS darstellt. Im frühen foetalen Stadium des Hundes besteht der Bereich zwischen den beiden Gefäßplexus aus undifferenziertem Bindegewebe. Mit der weiteren Entwicklung und damit Differenzierung des Foetus und seiner Organe kommt es zu einer lokalen Differenzierung in diesem Hautabschnitt zwischen dem praesumptiven subkutanen und dem praesumptiven tiefen dermalen Gefäßplexus. Diese Unterhaut kann sich ganz unterschiedlich weiter differenzieren und ist nicht, wie ursprünglich häufig angenommen, nur auf die Ausformung eines „lockeren, unregelmäßig angeordneten Bindegewebes (LIEBICH, 1990)“ beschränkt. Ebenso wie die Dermis und die Epidermis sind auch die Ausprägung und die Struktur der Subkutis an ihre Funktionen gekoppelt und passen sich innerhalb der einzelnen Segmente den jeweiligen funktionellen Bedürfnissen an. Solche unterschiedlichen, FUNKTIONSGEKOPPELTEN MODIFIKATIONEN der Unterhaut sind bereits ausführlich von HOMBERGER und DE SILVA (2000) für die Unterhaut des Vogels als wichtiger funktioneller Bestandteil der Flugfähigkeit, sowie von RÄBER (2000) und WESTERFELD (2003) für die Unterhaut des Ballensegmentes der Klaue des Rindes z. B. als Teil des Klauenbeinträgers beschrieben worden. Darstellungen

über die Unterhaut sowie Unterhautmodifikationen im Bereich der Kralle des Fleischfressers fehlen dagegen oder sind nur unvollständig.

Die derzeitigen Beschreibungen des subkutanen Gewebes am Zehenendorgan beziehen sich vorwiegend auf den Zehenballen bzw. auf die Fingerbeere sowie an Huf und Klaue auf den Saum-, Kron- sowie Ballenabschnitt. Dabei ist allen diesen Unterhautstrukturen die Ausbildung eines „typischen“ Subkutispolsters gemein. Allein HABERMEHL (1996) stellt im Bereich des Wand- sowie des Sohlensegmentes von Huf und Klaue die Unterhaut als modifiziertes Gewebe dar, welches im Wand- und Sohlensegment das Periost des Klauen- bzw. Hufbeines, sowie das Perichondrium des Hufknorpels bildet. Eigene Untersuchungsergebnisse zur Entwicklung der Unterhaut an der Hundekralle im Prae- sowie Perinatalstadium ergeben, dass aufgrund der oben genannten neuen Beurteilungskriterien in allen Segmenten der Kralle eine Unterhaut besteht. Diese wird bis zum Zeitpunkt der Geburt des Hundes sowie postnatal regional unterschiedlich modifiziert. So befindet sich im Bereich des SAUMSEGMENTES, entsprechend der homologen Zehenendorgane Huf (HABERMEHL, 1996, BRAGULLA, 1996) und Klaue (DIRKS, 1985; HABERMEHL, 1996) noch ein ausgeprägtes Subkutispolster im herkömmlichen Sinne. Die Unterhautgefäße sind in diesem Krallenabschnitt stark gewunden und verteilen sich damit auf den gesamten Unterhautabschnitt. Diese ausgeprägte dreidimensionale Angioarchitektur könnte mit der späteren funktionellen Belastung dieses Gebietes zusammenhängen, wobei die Belastung nicht, wie in anderen Segmentabschnitten, überwiegend unidirektional, sondern eher multidirektional abwechselnd als Stauchung und Streckung erfolgt. Eine gewundene, auf mehrere Ebenen verteilte Ausbildung der Gefäße ermöglicht eine höhere Flexibilität in diesem Gewebe. Dieses Phänomen beschreibt schon HIRSCHBERG (1999) im Zusammenhang mit der Angioarchitektur in der Rinderklaue. Die Ausbildung einer Subkutis im Saumsegment der Kralle ist bis dato noch nicht beschrieben worden. Der Grund dafür könnte daran liegen, dass bisher nur die Kralle des adulten Individuums betrachtet wurde. Wie eigene untersuchte Krallen adulter Hunde zeigen, hat sich vom Welpen über das juvenile Stadium bis zum adulten Hund im Bereich des Saumsegmentes der knöchernen Krallenfalz differenziert. Die Bildung dieser knöchernen Struktur als Resultat der subkutanen Verknöcherung im Saumsegment erscheint demzufolge überwiegend funktionell bedingt zu sein. Wie zuvor schon im Bereich des Wand- und Sohlensegmentes, kommt es auch in diesem Segment zu einer Verknöcherung der Subkutis.

Die Unterhaut des KRONSEGMENTES besteht zum Zeitpunkt der Geburt aus einem relativ straffen Bindegewebe. Entgegen der Darstellung von ERNSBERGER (1998) über das Kron-

segment der Katzenkrallen sowie von BRAGULLA (1996) und DIRKS (1985) über die Unterhaut des Kronsegmentes an Huf und Klaue handelt es sich in der Hundekralle nicht, wie bisher angenommen, um ein Subkutispolster im herkömmlichen Sinne, sondern um ein relativ straffes Bindegewebe, welches das Krallenbein einhüllt. Diese Unterhautschicht befindet sich sowohl im proximalen, als auch im distalen Kronsegmentabschnitt, wodurch der Rückenwulst aufgrund der Befunde zur pränatalen Entwicklung zum Kronsegment gerechnet werden kann. Ähnlich der fortschreitenden Modifikation der Unterhaut im Saumsegment von der juvenilen zur adulten Krallen, zeigen auch die untersuchten Krallen ausgewachsener Hunde im Kronsegment im Bereich der Subkutis eine Verknöcherung. Im Zuge dieser Verknöcherung kommt es auch bis zur adulten Hundekralle zu einer Verlagerung der Eintrittsstellen der Gefäße in den Arcus terminalis weiter nach proximal. Die Beurteilung der Ausdehnung des Kronsegmentes ausschließlich anhand der adulten Hundekralle erklärt die unvollständigen Angaben von SIEDAMGROTZKY (1870), TRAUTMANN (1949) sowie von KRÖLLING (1960) über das „Fehlen“ einer Subkutis im Kronsegment der Hundekralle.

Um den Geburtszeitraum herum sind die Unterhautgefäße von WAND und SOHLE vollständig von knöchernem Gewebe umgeben, im Bereich des Krallenbeinfortsatzes hat sich aus den Unterhautgefäßen der Arcus terminalis gebildet. Damit kann der Abschnitt zwischen dem Arcus terminalis (eigentliches subkutanes Gefäßnetz von Wand und Sohle) und dem tiefen dermalen Gefäßplexus als Unterhaut abgegrenzt werden. Diese besteht im Wandsegment und im Sohlensegment vorwiegend aus Geflechtknochen sowie aus dem Periost und einem schmalen Bereich aus lockerem Bindegewebe. Die Verknöcherung der Subkutis von Wand- und Sohlensegment erfolgt schon relativ früh (ab 63 mm SSL) in der pränatalen Entwicklung der Hundekralle und bildet damit die erste Modifikation der Subkutis in der Krallenentwicklung. Die Befunde zur Umformung der Subkutis im Wand- und Sohlensegment an der Hundekralle ergänzen damit die Angaben von HABERMEHL (1996) über die Umgestaltung der Subkutis von Wand- und Sohle an Huf und Klaue. Während HABERMEHL (1996) keine Erklärung über die Modifizierung der Subkutis in diesen Abschnitten gibt, lässt sich diese nun anhand der pränatalen Entwicklung des Gefäßsystems der Hundekralle nachvollziehen.

Das BALLENSEGMENT zeigt entsprechend den Angaben bei homologen Zehenendorganen – Huf und Klaue – eine deutliche Ausprägung eines Subkutispolsters. Obwohl perinatal noch keine Fettgewebseinlagerung innerhalb der Subkutis des Zehenballens auftritt, deutet schon die dicke, aus lockerem Bindegewebe bestehende Schicht auf die spätere Ausprägung eines Subkutispolsters hin. Die Gefäße liegen in diesem Bereich, ähnlich wie die des Saumsegmentes, nicht einheitlich auf einer Ebene, sondern sind eher über das subkutane Gewebe

verteilt. Diese Anordnung der Gefäße dient der Anpassung an die spätere multidirektionale Zug- und Druckbelastung.

AUSBILDUNG DES PAPILLARKÖRPERS DER HUNDEKRALLE IM PRAE- UND PERINATALEN STADIUM

Wie die eigenen Untersuchungsergebnisse darlegen, wird die Ausbildung des segment-spezifischen Papillarkörpers durch die Interaktion von Dermis und Epidermis geprägt. Damit differenziert sich auch das Gefäßsystem entsprechend aus. Aus dem OBERFLÄCHLICHEN DERMALEN GEFÄßPLEXUS bilden sich an der dermo-epidermalen Grenzfläche subepitheliale Kapillaren aus. Diese können sich im Zusammenhang mit der weiteren Ausdifferenzierung des Papillarkörpers zu einem SUBEPITHELIALEN GEFÄßPLEXUS weiter entwickeln.

Die Ausformung des segmentspezifischen PAPILLARKÖRPERS beginnt mit der lokalen Proliferation des Stratum basale der Krallenepidermis, welche dadurch die dermo-epidermale Oberfläche zwischen zwei subepithelialen Kapillaren „einfaltet“. Diese Befunde entsprechen den Literaturangaben von ERNST (1954) und BRAGULLA (1996) über die Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers am Pferdehuf sowie von DIRKS (1985) über diejenige der Rinderklaue. Die Gefäße dienen als Leitschiene für die sich ausbildenden Basalzellsprosse.

Mit der Verknöcherung der Subkutis im distalen sowie palmaren Bereich des Krallenbeinfortsatzes, also mit dem Einsetzen der Ausformung von Wand- und Sohlensegment, beginnt die Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers im Verlaufe der foetalen Hundekrallenentwicklung. Dieses stimmt mit den Angaben von ZIETZSCHMANN (1918), ERNST (1954) und BRAGULLA (1996) über die Entwicklung des Papillarkörpers am Pferdehuf überein. Da jedoch die Verknöcherung des distalen Zehenknochens bei Pferd und Rind in einer zeitlich früheren Entwicklungsphase einsetzt, beginnt bei diesen Tieren auch die Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers früher als an der foetalen Hundekralle. Die Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers der Hundekralle erfolgt überwiegend an die Funktion gekoppelt mit dem Einsetzen der Belastung erst peri- sowie postnatal.

Diese Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers beginnt bei Pferd und Rind nach der Ausbildung der ersten Anlagen eines Subkutispolsters im Kron-, Wand- sowie Sohlensegment und zuletzt im Strahl/Ballen- und Saumsegment. An der foetalen Hundekralle beginnt die Ausformung eines segmentspezifischen Papillarkörpers zeitgleich mit der

Verknöcherung der Subkutis in Wand und Sohle. Wie die eigenen Befunde zeigen, entwickeln sich zuerst im Krallenspitzenbereich kleine Mikroleisten. Aus diesen terminalen Mikroleisten differenzieren sich in der weiteren Entwicklung des Foetus Leisten, welche bis zur Geburtsreife des Hundes zu Blättchen vergrößert werden. Diese Blättchen entwickeln sich von distal nach proximal. Perinatal werden die Lederhautblättchen im Krallenspitzenbereich mit nach distal zeigenden Terminalpapillen besetzt. Diese Befunde stehen im Gegensatz zu der Darstellung zur Entwicklung der Katzenkrallen von ERNSBERGER (1998), die weder die Ausbildung von Terminalleisten noch von Terminalpapillen an der sich entwickelnden Katzenkrallen beschreibt. Die erste Ausdifferenzierung des Papillarkörpers im Wandsegment stimmt mit der Darstellung von BRAGULLA (1996) über die Entwicklung des Papillarkörpers im Pferdehuf überein. Neben dem Einsetzen der Papillarkörperentwicklung am Übergang vom Kron- zum Wandsegment in Form niedriger Lederhautleisten, bilden sich zeitgleich am Pferdehuf separat im terminalen Teil des Wandsegmentes kleine Leisten aus. Diese werden am Huf des Pferdes (BUCHER, 1987; BRAGULLA u. MÜLLING, 1992) sowie an der Klaue des Rindes (DIRKS, 1985) im Laufe der Entwicklung zu den terminalen Abschnitten der primären Lederhautblättchen ausgeformt und mit Terminalpapillen besetzt. Auch am menschlichen Fingernagel werden am freien distalen Ende des Papillarkörpers des Nagelbettes Leisten mit aufsitzenden Papillen beschrieben (BLOOM u. FAWCETT, 1975). Die am Pferdehuf (BRAGULLA, 1996) sowie an der Rinderklaue (MÜLLING, 1999) am Übergang vom Kron- zum Wandsegment ausgebildeten Leisten entsprechen an der foetalen Hundekralle den Leisten, welche sich ab 130 mm SSL am distalen Ende des Rückenwulstes ausbilden und daraufhin sich mit den von distal kommenden Leisten des Zehenrückenteiles des Wandsegmentes verbinden. Eine proximodistal orientierte Differenzierungsrichtung der Wandleisten, wie sie an Pferdehuf (KUNSIEN, 1882; BRAGULLA, 1996) und Rinderklaue (KUNSIEN, 1882) beschrieben werden, kann jedoch an der Hundekralle nicht beobachtet werden.

Der PAPILLARKÖRPER DES WANDSEGMENTES der Krallen einer eine Woche alten Welpen ist in seinen proximolateralen Abschnitten glatt. Ab dem mittleren Drittel bilden sich proximodistal parallel verlaufende (primäre) Leisten, die proximodistal an Höhe zunehmen. Im distalen Drittel des Wandsegmentes haben sich aus den Leisten Blättchen entwickelt. Auf den Seitenflächen dieser Wandsegmentblättchen eines geburtsreifen Hundes entspringen wiederum kleine Leisten. Diese Leisten können in Homologie/Homonomie zu Huf und Klaue als sekundäre Lederhautleisten bezeichnet werden. Im distalen sowie lateralen Krallenspitzenbereich enden die Blättchen und tragen auf ihren Firsten distopalmar gerichtete Kappen- und

Terminalpapillen. Die exemplarisch untersuchten Krallen von Hunden im adulten Entwicklungsstadium weisen nur noch im Bereich der Krallenspitze Blättchen auf. Wie schon SEIDEL (1992) für die adulte Hundekralle darstellt, bilden sich neben den Terminalpapillen am Blättchenende auf den Blättchenfirsten deutliche distale Kappenpapillen des Wandsegmentes aus. Dieses gilt ebenso für die homologen Zehenendorgane Huf (BRAGULLA, 1996) und Klaue (DIRKS, 1985). Die Abgrenzung der distalen Kappenpapillen von den terminalen Wandpapillen ist ähnlich diffizil wie am Pferdehuf (BRAGULLA, 1996). Im Zehenrückenteil des Wandsegmentes der adulten Hundekralle werden die proximalen Kappenpapillen kontinuierlich von distalen Kappenpapillen fortgesetzt, da dieser Abschnitt des Wandsegmentes sehr kurz ist. Gleiches gilt auch für die Kappenpapillen im Eckstreben teil des Wandsegmentes im Pferdehuf.

Während die maximale Höhe der Wandblättchen im Huf eines geburtsreifen Pferdefoetus an der Grenze zum Kronsegment erreicht ist, laufen in der perinatalen Hundekralle die Blättchen in Form von Leisten und Mikroleisten proximal auf dem Rückenwulst aus und verbinden sich perinatal in Form von Mikroleisten mit den Leisten des proximalen Teils des Kronsegmentes. In gleicher Weise werden die primären Lederhautblättchen des Wandsegmentes im Pferdehuf kontinuierlich von Lederhautleisten im distalen Teil des Kronsegmentes fortgesetzt, wobei auf diesen Leisten reihenförmig angeordnete Kronsegmentpapillen entspringen. Am Übergang zwischen Wandsegment und distalem Teil des Kronsegmentes (= Rückenwulst) bilden sich kurz vor der Geburt des Hundes auf den Leisten sitzende terminale Kronpapillen aus. Die weiter proximal am distalen Ende des Rückenwulstes ausgebildeten Papillen können in Homologie/Homonomie zu Pferdehuf und Rinderklaue Kappenpapillen des Kronsegmentes genannt werden.

Ebenfalls mit Beginn der zweiten Phase der Krallenentwicklung entwickeln sich im proximalen Teil des Kronsegmentes von proximopalmar nach dorsodistal in einer s-förmigen Kurve verlaufende (primäre) Leisten. Diese nehmen auf dem Krallenrücken distal verlaufend wieder ab. Der Verlauf ähnelt demjenigen der Leisten des Kronsegmentes an dem foetalen Pferdehuf (BRAGULLA, 1996). Ebenso wie am Pferdehuf und an der Rinderklaue (KUNSIEN, 1882) differenzieren sich an der Hundekralle, am Übergang vom distalen ins mittlere Drittel des proximalen Teiles des Kronsegmentes beginnend, aus den Leisten in distoproximaler sowie in dorsopalmarer Richtung Lederhautpapillen - proximale Kronlederhautpapillen - aus. Dieses erklärt, warum an der Kralle eines eine Woche alten Welpen neben den dorsalen Papillen noch laterale Leisten vorkommen. Eine solche Leisten- und Papillenenwicklung kann ERNSBERGER (1998) auch für die Entwicklung der Katzenkralle

bestätigen, wobei jedoch die Leisten- und Papillenentwicklung an der Katzenkralle viel schwächer ausgeprägt ist als in der Hundekralle.

Die Ausbildung des PAPILLARKÖRPERS DES KRONSEGMENTES in Form von proximalen Papillen sowie distalen (im Bereich des Rückenwulstes liegende) Mikroleisten, Leisten sowie Blättchen stimmt mit den homologen Zehenendorganen Fingernagel (BLOOM u. FAWCETT, 1975), Huf (BRAGULLA u. MÜLLING, 1992) und Klaue (DIRKS, 1985) überein. So entspricht die Lunula des menschlichen Nagels dem bindegewebigen Rückenwulst der Hundekralle. Ebenso wie der Papillarkörper des Rückenwulstes der Hundekralle weist die Lunula einen glatten oder leistenförmigen Papillarkörper (BLOOM u. FAWCETT, 1975) auf. Auch BRAGULLA und MÜLLING (1992) beschreiben am distalen Ende des Kronsegmentes des Pferdehufes sowie DIRKS (1985) am distalen Ende des Kronsegmentes der Rinderklaue Leisten, auf deren Firsten Papillen entspringen können.

Eine Besonderheit des distalen Teiles des Kronsegmentes ist neben der Ausbildung des leistenförmigen Papillarkörpers seine allgemeine Form in der Fleischfresserkralle. Durch eine dicke dermale Bindegewebsschicht bildet sich der wulstförmige, im Querschnitt pilzförmige Rückenwulst aus. Dieser ist bei der Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) viel stärker ausgeprägt als an der Hundekralle. Seine Funktion soll im Zusammenhang mit den allgemeinen Funktionen des Papillarkörpers der Hundekralle diskutiert werden. Die untersuchten Krallen adulter Hunde weisen im Bereich des Kronsegmentes ein etwas anderes Bild auf als die der perinatalen Hundekralle. Im proximalen Teil des Kronsegmentes treten in den Krallen adulter Hunde nur noch vereinzelt Papillen auf, ebenso erscheint auch der Papillarkörper des distalen Teiles des Kronsegmentes weniger strukturiert. In gleicher Weise wie es zu einer Weiterentwicklung resp. Anpassung der Papillarkörperform kommt, verändert sich auch der bindegewebige Rückenwulst. Dieser ist an den hier untersuchten Krallen adulter Hunde an der Oberfläche nur noch mit kleinen Leisten versehen oder sogar ganz glatt und ragt kaum mehr wulstförmig hervor. Nur noch am distalen Ende des „Rückenwulstes“ weist der Papillarkörper die Form der bereits beschriebenen Blättchen mit aufsitzenden terminalen Kronpapillen auf, wie sie für die Krallen von Hundewelpen charakteristisch sind. Auch wenn SEIDEL (1992) den Rückenwulst der Hundekralle nicht zum Kron- sondern zum Wandsegment rechnet, so stimmen seine Darstellungen über den Papillarkörper mit den eigenen Befunden überein. Während SEIDEL (1992) jedoch für den proximalen Teil des Kronsegmentes auch an der adulten Hundekralle einen zöttchenförmigen Papillarkörper beschreibt, kann dieses durch die eigenen Befunden nicht bestätigt werden.

Die Fortsetzung der Leisten des Wandsegmentes in palmarer Richtung bilden die Leisten der Sohle. Diese ziehen parallel angeordnet proximodistal. An der Kralle eines geburtsreifen Foetus reichen diese Leisten nur bis in das mittlere Drittel des Sohlensegmentes und laufen dann aus. Die dermo-epidermale Oberfläche des proximalen Krallensohlenabschnittes ist auch bei einem eine Woche alten Welpen noch glatt. Perinatal differenzieren sich, wiederum distal beginnend, aus den Leisten kleine Papillen. Am Übergang vom distalen ins mittlere Drittel des Sohlensegmentes neigt sich der Papillenfist nach distal. Ähnlich wie im proximalen Teil des Kronsegmentes sind auch im Sohlensegment an der perinatalen Hundekralle neben Papillen noch kleine Leisten zu sehen. Wie BRAGULLA (1996), ERNST (1954) sowie ZIETZSCHMANN und KRÖLLING (1955) zur Entwicklung des Papillarkörpers des Kronsegmentes sowie des Sohlensegmentes des Pferdehufes angeben, spiegelt die Länge und Dicke der Lederhautpapillen die Richtung der Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers wider. So differenzieren sich die Papillen des Sohlensegmentes der Hundekralle in distoproximaler Richtung, wie sich auch die Papillen des Sohlensegmentes der homologen Zehenendorgane Huf (BRAGULLA, 1996; ERNST, 1954) und Klaue (KUNSIEN, 1882) in zentripetaler Richtung entwickeln. An der sich entwickelnden Katzenkralle tritt nach ERNSBERGER (1998) keine Zergliederung der Leisten in Papillen auf. ERNSBERGER (1998) beschreibt für das Sohlensegment der Katzenkralle einen blättchenförmigen Papillarkörper, der auch im Sohlensegment der Kralle adulter Katzen in dieser Form erhalten bleibt (BRAGULLA et al., 2001). Dieser blättchenförmige Papillarkörper des Sohlensegmentes der Katzenkralle steht nicht im Widerspruch zu den auf Leisten entspringenden Papillen des Sohlensegmentes an der Hundekralle, da die Leisten die Urform bzw. Vorform der Papillen bilden (BRAGULLA, 1996). Dies lässt sich auch anhand der eigenen Befunde der Entwicklung der Hundekralle bestätigen, da auch an der Kralle des Hundes während der prae- sowie perinatalen Entwicklung des Zehenendorganes erst Lederhautleisten und dann zeitlich etwas versetzt Lederhautpapillen auftreten.

Die Frage nach dem Vorkommen eines Sohlensegmentes am menschlichen Fingernagel wird in der Literatur konträr beantwortet. Die in der Literatur beschriebenen Angaben über den Papillarkörper im Fingernagel des Menschen sind widersprüchlich, wodurch eine Zuordnung der am freien Rand des Nagelbettes auftretenden distalen Papillen als terminale Papillen des Wandsegmentes oder als Sohlenpapillen nicht möglich ist. Die distal auf Lederhautleisten entspringenden Papillen werden im Fingernagel entweder dem Terminalabschnitt des Wandsegmentes (BLOOM u. FAWCETT, 1975) oder dem Sohlensegment (RUNNE u. ORFANOS, 1981; SANGIORGI et al., 2004) zugeordnet.

Der PAPILLARKÖRPER DES SOHLESEGMENTES der untersuchten Krallen adulter Hunde besteht im distalen Drittel aus Papillen. Im mittleren und proximalen Drittel sind kleine Leisten zu erkennen. Diese Leisten ziehen parallel verlaufend distoproximal. Im Unterschied zu den Verhältnissen an der Welpenkralle stehen sie weniger dicht, ihr Abstand zueinander hat sich vergrößert. Weiterhin haben sich im proximalen Sohlensegmentabschnitt der Kralle eines adulten Hundes auf den Leisten kleine, „warzenförmige“ Papillen gebildet. Diese Befunde stimmen mit den Angaben von SEIDEL (1992) über das Sohlensegment der Kralle adulter Hunde überein.

Die Ausbildung des segmentspezifischen PAPILLARKÖRPERS DES BALLESEGMENTES setzt ebenfalls mit dem Beginn der zweiten Phase der Krallenentwicklung ein. Der Prozess der Papillenbildung beginnt am freien, distal ragenden Rand des Ballensegmentes und setzt sich in proximopalmarer Richtung fort. Eine noch vor der Ausformung der Papillen auftretende Leistenstruktur, wie sie für die homologen Zehenendorganen Huf (BRAGULLA, 1996) und Klaue (KUNSIEN, 1882) beschrieben wird, kann in den Ballensegmenten der Hundefoeten nicht festgestellt werden. Ob sich diese im Zuge der Entwicklung der Hundekralle wirklich nicht ausbildet, ist aufgrund des begrenzten Materials nicht eindeutig zu sagen. Wie die Befunde zeigen, ist bis zur Geburtsreife des Hundefoetus ein deutlicher zöttchenförmiger Papillarkörper im palmaren Teil des Ballensegmentes ausgebildet. Im Strahl/Ballensegment des Hufes sowie im Ballensegment der Klaue, das zum Ballensegment der Hundekralle homolog ist, erfolgt die Ausformung von Lederhautpapillen ebenfalls in proximodistaler Richtung. Mit der Ausformung von Papillen entspricht die Papillarkörperform im Ballensegment des Hundes derjenigen im Zehenballen der Katze (KARMANN, 2001) sowie der im Strahl/Ballensegment von Huf (BRAGULLA, 1996) und Klaue (KUNSIEN, 1882).

Der PAPILLARKÖRPER DES SAUMSEGMENTES ist entsprechend zu den Befunden über den Papillarkörper des Saumsegmentes der Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) sowie des Fingernagels (RUNNE u. ORFANOS, 1981) glatt. Im Gegensatz dazu ist der Papillarkörper im Saumsegment von Huf und Klaue durch die Ausformung von schlanken Lederhautpapillen gekennzeichnet, die in proximodistaler Richtung länger werden. Diese Unterschiede in der Form des Papillarkörpers des Saumsegmentes der Katzen- und Hundekralle im Vergleich zu derjenigen der Klaue bzw. des Hufes dürfte mit der höheren Hornbildungsrate im Saumsegment von Huf und Klaue zusammenhängen, die eine intensivere Ernährung per Diffusion nötig macht, was durch eine vergrößerte Oberfläche des Papillarkörpers bewerkstelligt wird (BRAGULLA, 1996).

ENTWICKLUNG DER KRALLENEPIDERMIS

In gleicher Weise wie die foetale Entwicklung der Hufepidermis des Pferdes (BRAGULLA, 1996), erfolgt auch die foetale Entwicklung der Krallenepidermis kontinuierlich. Dabei zeigen die Epidermiszellen fortschreitende Veränderungen im Keratinisierungs- und Verhornungsprozess. Entsprechend der kontinuierlichen foetalen Entwicklung der Epidermis des Pferdehufes lässt sich auch die Entwicklung der Krallenepidermis in drei, bzw. in vier aufeinander folgende Generationen unterscheiden.

BRAGULLA (1996) bezeichnet die Zellgenerationen, welche sich bei der Entwicklung der foetalen Hufoberhaut bilden, als „Epidermisgenerationen“. Eine Epidermis bezeichnet immer ein mehrschichtig verhornendes Plattenepithel. Nach der Definition von BRAGULLA (1996) ist unter einer „Epidermisgeneration“ ein Zellverband aus Tochterzellen des Stratum basale zu verstehen, die denselben Keratinisierungs- und Verhornungsprozess in einem annähernd gleichen Umfang durchlaufen. Die aufeinander folgenden Epidermisgenerationen werden in den verschiedenen Segmenten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien gebildet (BRAGULLA, 1996). Die praesumptive Epidermis der Hundekralle entspricht noch nicht in allen Entwicklungsstadien einer Epidermis im eigentlichen Sinne, wodurch sich nach strenger Einhaltung der Definition für die Entwicklung der Oberhaut an der Hundekralle vier „EPITHELGENERATIONEN“ ergeben. Während die erste Epithelgeneration vorerst noch ein zweischichtiges Epithel aus Ektoderm sive Stratum basale und Periderm ist, handelt es sich bei den drei darauf folgenden Epithelgenerationen um mehrschichtige Epithelien. Eine Epidermis im eng definierten Sinne ist an der foetalen Hundekralle erst ab der dritten Epithelgeneration entstanden. Erst in diesem Stadium ist das Epithel in allen Segmentabschnitten wie ein mehrschichtiges, verhornendes Plattenepithel aufgebaut.

Ebenso wie für die Epidermisgenerationen des Pferdehufes gilt für die foetale Krallenepidermis des Hundes, dass unter einer „Epithelgeneration“ an der Hundekralle ein Epithel verstanden wird, welches lichtmikroskopisch in den einzelnen Krallensegmenten ähnliche Strukturen aufweist. In gleicher Weise wie die „Epidermisgeneration“ des foetalen Pferdehufes werden die „Epithelgenerationen“ in den verschiedenen Krallensegmenten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien aufgebaut. Für die Unterteilung der Epidermisgenerationen des Pferdehufes stellt BRAGULLA (1996) das Periderm als Teil der Hufkapsel vorne an. Da in dieser Untersuchung der Entwicklung der Epidermis der Hundekralle von „Epithelgenerationen“ gesprochen wird, wird das Periderm an der foetalen Hundekralle als erste

Epithelgeneration bezeichnet, da diese erste Generation von Tochterzellen der ektodermalen resp. basalen Zellen den gleichen Differenzierungsgrad erreichen.

Die von BRAGULLA (1996) am Pferdehuf beschriebene granuliert Zellschicht in der Epidermis, welche sich in allen Segmentabschnitten während der zweiten Epidermisgeneration ausbildet, tritt in der foetalen Hundekralle nicht auf. Zu bemerken ist jedoch an dieser Stelle, dass sich an den untersuchten Krallen an der Spitze der Welpenkralle vier Wochen post natum ein Stratum granulosum ausbildet, welches an den exemplarisch untersuchten adulten Hundekralen nicht mehr zu diagnostizieren ist. Ein phasenartiges Auftreten eines Stratum granulosum ist also auch während der Entwicklung der Hundekralle in gleicher Weise wie in der foetalen Epidermis von Huf und Klaue zu beobachten. Dieses tritt jedoch erst in der letzten Epidermiszellgeneration auf und müsste an der sich postnatal weiter entwickelnden Kralle noch genauer untersucht werden.

Perinatal haben alle Segmentabschnitte das Stadium der vierten Epithel- bzw. das Stadium der zweiten Epidermisgeneration erreicht. Innerhalb dieser Epidermisgeneration tritt segmentspezifisch ein weicher oder ein harter Verhornungsmodus auf. Der weiche Verhornungsmodus ist durch die Ausbildung eines Stratum granulosum gekennzeichnet, während bei der Differenzierung der Epidermiszellen im Verlaufe des harten Verhornungsmodus kein Stratum granulosum gebildet wird. Entsprechend zu den homologen Zehenendorganen Pferdehuf (BRAGULLA, 1996; BUCHER, 1997), Rinderklaue (DIRKS, 1985) sowie Fingernagel (HORSTMANN, 1955; GOETTLER, 1959) sowie übereinstimmend mit den Angaben von SEIDEL (1992) über die adulte Hundekralle, tritt auch in der SAUMEPIDERMIS der Hundekralle perinatal ein Stratum granulosum auf. ERNSBERGER (1998) beschreibt an der Katzenkralle am Saumsegment zwei unterschiedliche Hornqualitäten. Nur der distale Teil des Saumsegmentes bildet ein Stratum granulosum aus, der proximale, am inneren Umschlagrand der Krallentasche liegende Bereich des Saumsegmentes verhornt an der Katzenkralle nach dem Prinzip der harten Verhornung, also ohne ein Stratum granulosum auszubilden. Diese Unstimmigkeit zur Hundekralle liegt an den unterschiedlichen Segmentdefinitionen. Der hart verhornende Teil der Saumboberhaut der Katzenkralle nach der Definition von ERNSBERGER (1998) entspricht nach den eigenen Untersuchungen an der Hundekralle dem äußeren proximalen Teil des Kronsegmentes.

Das EPITHEL DES KRONSEGMENTES verhornt nach dem Prinzip der harten Verhornung und ist charakterisiert durch seine hohe Hornbildungsrate. Damit entsprechen der Verhornungsmodus sowie die Hornbildungsrate der Hundekralle dem Prinzip der Verhornung homologer

Zehenendorgane. Während sich an Huf (BUCHER, 1987; BRAGULLA, 1996) und Klaue (DIRKS, 1985) Hornröhrchen sowie Zwischenröhrchenhorn ausbilden, sind diese an der Hundekralle im Perinatalstadium nicht zu sehen. SEIDEL (1992) beschreibt für die Kralle adulter Hunde Kronhornröhrchen, welche zur Oberfläche hin bzw. distal verstreichen. Die Ausbildung von Kronhornröhrchen ist an HundekralLEN im perinatalen sowie an den hier untersuchten HundekralLEN im juvenilen und adulten Stadium nicht zu erkennen. Das könnte mit der altersabhängigen oder individuellen Variationsbreite der Dimensionen der Kronsegmentpapillen zusammenhängen, weil eine Mindestlänge und -dicke der Lederhautpapillen Voraussetzung dafür sind, dass die Architektur des Hornzellverbandes durch die Papillarkörperform beeinflusst wird (MÜLLING, 1993; BRAGULLA u. HIRSCHBERG, 2003).

Die hier untersuchten Krallen adulter Hunde stellen keinesfalls eine repräsentative Auswahl Krallen adulter Hunde dar und deshalb sind die Befunde nur bedingt zu verallgemeinern. Eine Bildung von Kronhornröhrchen, wie sie SEIDEL (1992) beschreibt, kann daher durchaus auch an der Kralle einiger adulter Hunde auftreten.

Das EPITHEL DES WANDSEGMENTES differenziert sich ebenfalls nach dem Prinzip der harten Verhornung und ist, bis auf den Bereich der Krallenspitze, durch eine geringe Hornbildungsrate charakterisiert. Über dieses Epithel des Wandsegmentes gibt es in der Literatur für die homologen Zehenendorgane unterschiedliche Angaben. Mit Ausnahme des terminalen Abschnittes des Wandsegmentes ist allen Zehenendorganen ein harter Verhornungsmodus im Wandsegment gemein, aber Unterschiede sind in der Hornbildungsrate festzuhalten. Während die Wandepidermis der Zehenendorgane von Hund, Katze, Mensch und Pferd eine geringe Hornbildungsrate aufweist, ist die Produktion von Kappenhorn im Wandsegment des Rindes und der Giraffe Ausdruck für eine im Verhältnis zu den homologen Zehenendorganen deutlich höhere Hornbildungsrate (DIRKS, 1985; MÜLLING, 1999; BRAGULLA, 2003) beschrieben. Eine solche hohe Produktionsrate von Kappenhorn tritt im Pferdehuf nur bei Hufrehe auf. Der terminale Bereich des Wandsegmentes ist bei allen homologen Zehenendorganen durch seine hohe Hornbildungsrate ausgezeichnet. Dabei ist an der Hundekralle im Perinatalstadium in diesem Krallenabschnitt kein Stratum granulosum zu erkennen. Abweichend von diesen Angaben beobachten SEIDEL (1992) an der Kralle adulter Hunde, ERNSBERGER (1998) an der Katzenkralle sowie MÜLLING (1993) an der Rinderklaue in diesem Abschnitt durchaus ein Stratum granulosum, welches nach BRAGULLA (1996) prä- und auch noch perinatal am Pferdehuf auftreten kann. Nach den eigenen Untersuchungen tritt ein Stratum granulosum vorübergehend an der Hundekralle eines vier Wochen alten Welpen auf, ist jedoch an den untersuchten Krallen adulter Hunde nicht mehr festzustellen.

Das Auftreten eines solchen Stratum granulosum im SOHLESEGMENT der Krallen adulter Hunde (SEIDEL, 1992) sowie der Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) kann auch perinatal für die Hundekralle bestätigt werden. Abweichend davon wird im Sohlensegment der ausgereiften Rinderklaue (MÜLLING, 1992) und im Pferdehuf (BUCHER, 1987; BRAGULLA, 1992) ein Stratum granulosum in diesem Segment nicht aufgebaut.

Die segmentspezifisch differenzierte EPIDERMIS DES BALLESEGMENTES entwickelt sich an der foetalen Hundekralle erst relativ spät – im letzten Drittel der zweiten Entwicklungsphase der Krallenentwicklung – und verhornt ebenso wie die Epidermis im Sohlensegment nach dem Prinzip der weichen Verhornung. Während dieses nach KARMANN (2001) auch für die Katzenkralle zutrifft, gibt es über die Angaben zur Verhornung der Ballenoberhaut homologer Zehenendorgane unterschiedliche Darstellungen. Im Huf und in der Klaue treten beide Verhornungsmodi nebeneinander auf. So verhornt die Epidermis im distalen Teil des Ballensegmentes der Rinderklaue ohne die Ausformung eines Stratum granulosum, während ein solches im proximalen Teil des Ballensegmentes sehr deutlich ausgebildet ist. Ähnliche Verhältnisse liegen im Pferdehuf vor, wo der distale Teil der Zehenballenepidermis – die Epidermis des Strahles – auch ohne Entwicklung eines Stratum granulosum verhornt, im proximalen Teil des Zehenballens wiederum entsteht ein deutliches Stratum granulosum im Zuge der Keratinisierung und Verhornung.

Die späte Ausdifferenzierung der Epidermis des Zehenballens des Hundes (und der Katze) ist auf seine im Vergleich zum Aufbau der behaarten Haut geringe Spezialisierung und Modifizierung zurückzuführen. Eine frühzeitige Entwicklung dieses Segmentes scheint bei den Nesthockern im Gegensatz den Nestflüchern funktionell nicht notwendig zu sein.

5.5 FUNKTION VON UNTERHAUT, PAPILLARKÖRPER UND OBERHAUT DER HUNDEKRALLE IM PRAENATALEN, PERINATALEN UND ADULTEN STADIUM

Die Ausdifferenzierung der Form und Struktur von Unter-, Leder- und Oberhaut ist stark funktionsabhängig. Dabei bilden die drei Hautschichten sowohl STRUKTURELL als auch FUNKTIONELL eine Einheit. Eine alleinige Betrachtung einer Hautschicht ohne die dazugehörigen anderen Hautschichten erschwert das Verständnis für die Ausbildung einer spezifischen Struktur innerhalb eines Segmentabschnittes des Zehenendorganes. Daher sind im nachfolgenden Text trotz der Untergliederung in einen Absatz für die Funktion der speziellen Unterhautstrukturen, des Papillarkörpers und der Oberhaut immer wieder überschneidende Erläuterungen für das Verständnis nötig.

Wie bereits erwähnt, entwickeln sich Hundewelpen als Nesthocker. Die eigenen Befunde zeigen, dass dieses Faktum durchaus Einfluss auf die Entwicklung der Kralle hat. So differenziert sich die Kralle des Hundes wie die Katzenkralle (ERNSBERGER, 1998) auch noch nach der Geburt des Tieres in weit stärkerem Umfang als Klaue und Huf. Diese Ausdifferenzierung der Strukturen post natum sind funktionsbedingt. Neben der Ausbildung der Krallenleiste differenzieren sich auch die anderen Hautschichten mit der weiteren Entwicklung des Tieres vom juvenilen zum adulten Stadium weiter.

UNTERHAUT SOWIE TIEFE DERMAL SCHICHTEN AM BESONDEREN BEISPIEL DES KRALLENPLATTENTRÄGERS

Die unterschiedliche Differenzierung der Unterhaut innerhalb der Kralle steht im Zusammenhang mit ihrer Funktion. Neben der funktionellen Einheit mit der Dermis und damit indirekt der Epidermis bildet die Subkutis auch eine funktionelle Einheit mit dem Krallenbein. Durch die Komplexität der Strukturen, sowohl im Aufbau als auch in ihrem Zusammenwirken, ist eine genaue Trennung zwischen Dermis und Subkutis nicht möglich, insbesondere im Kron-, Wand- und Sohlensegment nicht, wo vorwiegend die optimale Verankerung der Krallentüte für ihre Funktion als Graborgan, als Waffe oder zum Kratzen gewährleistet werden muss. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass gerade in der Funktion gravierende Unterschiede zwischen Hunde- und Katzenkrallen bestehen. Die Katze gebraucht ihre spitzen Krallen meist zum Klettern sowie als Waffen, wohingegen der Hund seine weitgehend stumpfen Krallen vorwiegend zum Graben einsetzt. Die durch Kratzen und Hängen entstehende Zugbelastung auf die Kralle ist somit an der Katzenkralle weitaus ausgeprägter als an der Hundekrallen, wodurch sich die strukturellen Unterschiede zwischen Hunde- und Katzenkrallen erklären lassen.

Die MODIFIKATIONEN an Krallenbein und Unterhaut der Hundekrallen haben unter anderem eine Verankerungs- sowie Stütz- und Pufferfunktion. In Anlehnung an die strukturellen und funktionellen Eigenschaften an der Rinderklaue (WESTERFELD, 2003), kann auch die Hundekrallen in zwei Abschnitte, einen KRALLENPLATTENTRÄGER sowie einen STOSSDÄMPFUNGSAPPARAT unterteilt werden. WESTERFELD (2003) gliedert den Fußungsapparat (weight-bearing apparatus) der Rinderklaue in zwei Bereiche, zum einen in den Klauenbeinträger (suspensory apparatus of the third phalanx), der sich wiederum in einen Klauenbeinträger „im engeren Sinne“ (bindegewebiger dermaler und epidermaler Teil des Wandsegmentes sowie unterstützende Teile des Sohlensegmentes) und „im weiteren Sinne“

(Klauenbeinträger im engeren Sinne inklusive der Streck- und tiefen Beugesehne sowie des gesamten Bandapparates) untergliedern lässt, und zum anderen in den Stoßdämpfungsapparat (shock-absorption apparatus: Druckabpufferung in Ballen- und Sohlensegment). Nach den eigenen Untersuchungsbefunden lassen sich diese Verhältnisse auch auf die sich postnatal weiter entwickelnde Hundekralle übertragen. Während der Fußungsapparat an der Rinderklaue (das Rind als „Zehenspitzenwandler“) und noch weiter am Pferdehuf (das Pferd als „Zehenspitzenrandwandler“) spezialisiert ist, schreitet die Ausdifferenzierung des „Fußungsapparates“ an der Hundekralle nicht so weit voran. Zudem ist der Begriff des „Fußungsapparates“ an der Hundekralle nur mit Einschränkungen anzuwenden, da nur ein geringer Teil der Kralle an der eigentlichen Fußung beteiligt ist. Die Funktion der Kralle liegt primär nicht, wie an Klaue und Huf, in einer tragenden Eigenschaft, sondern sie kommt erst durch den Gebrauch beim Kratzen und Graben zum Einsatz. Die Ausdifferenzierung des eigentlichen Fußungssystems an der Hundekralle beschränkt sich daher hauptsächlich auf den Zehenballen, die weiteren Strukturen dienen überwiegend der Befestigung der Krallenplatte am Krallenbein, damit diese der Lebensweise dieser Spezies entsprechend zum Graben und Scharren eingesetzt werden kann.

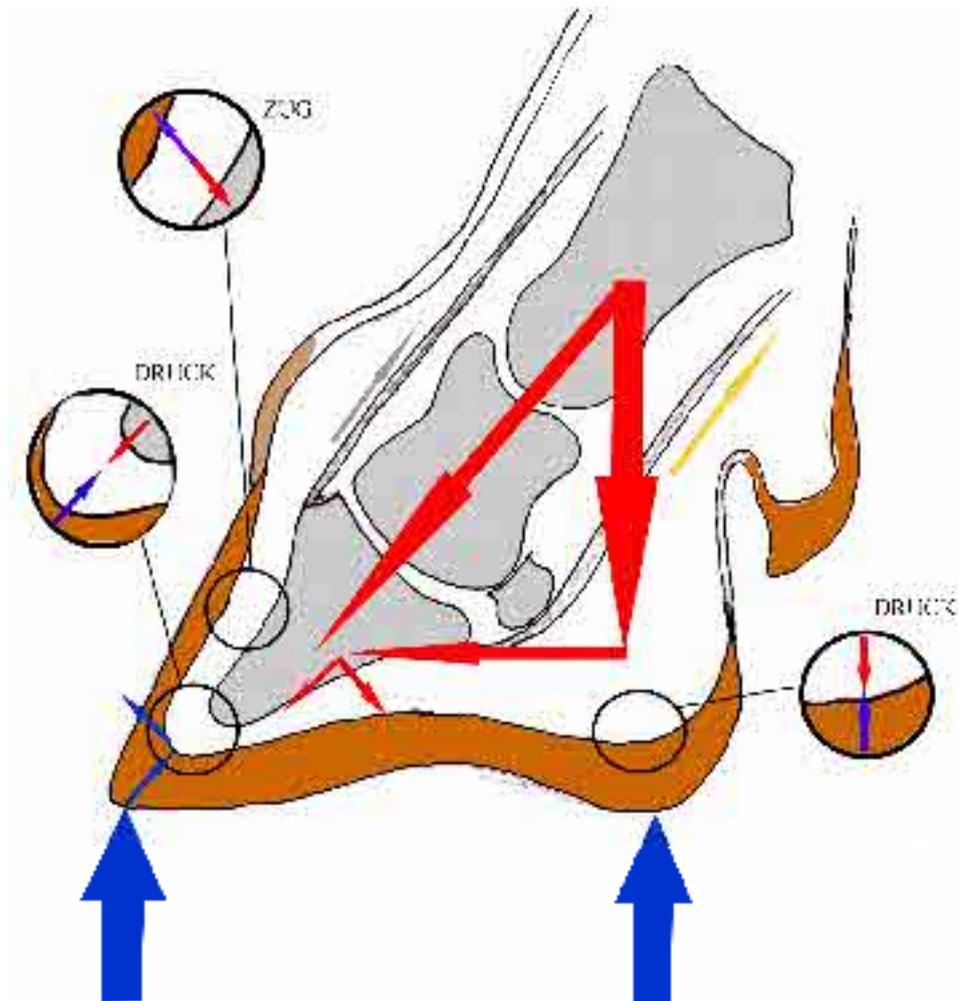
Mit der Verknöcherung der Subkutis im Wand- sowie Sohlenabschnitt der Hundekralle im Foetal- sowie Perinatalstadium bildet sich auch um den distalen Teil des Krallenbeinfortsatzes ein Geflecht aus trajektorieell ausgerichteten kollagenen Fasern. Am Krallenbeinfortsatz bildet sich ein faserknorpeliges Insertionsareal für den Krallenplattenträger. Dieses Areal ist jedoch noch weitaus weniger deutlich differenziert als dieses für die Insertionszone des bindegewebigen Teiles des Klauenbeinträgers (WESTERFELD, 2003) sowie des Hufbeinträgers (PELLMANN, 1995) beschrieben wird. Der Klauenbeinträger bzw. Hufbeinträger inseriert über eine chondralapophysäre Insertionszone an den Lamellen des Klauen- resp. Hufbeines. Ein Periost besteht nur noch in den rinnenförmigen Vertiefungen zwischen den Knochenlamellen der dritten Phalanx. Mit den hier angewandten Methoden lassen sich diese Strukturen der Insertionszone für die Hundekralle im Perinatalstadium nicht nachweisen. Die ausgebildeten kollagenen Fasern im Bereich des distalen Teiles des Wandsegmentes der Hundekralle strahlen in das umliegende Bindegewebe aus und bilden damit die erste Anlage des Krallenplattenträgers.

POSTNATAL, mit dem Eintreten der ersten Belastung, entwickeln sich im distalen Krallenbeinbereich innerhalb der Dermis vom Krallenbein bis an die Epidermis heranreichende, scherengitterartig angeordnete, dicke kollagene Faserbündel. Die Fasern weisen schon an der Kralle eines eine Woche alten Welpen eine spezifische, vom Krallenbein nach dorsolateral an

die dermo-epidermale Grenzzebene ziehende Verlaufsrichtung auf. Dabei ist an der Kralle eines einwöchigen Hundewelpen – ähnlich wie beim adulten Pferdehuf (PELLMANN, 1995) – eine Zunahme der kollagenen Fasern im distalen Zehenrückenteil sowie an der Krallenbeinspitze zu beobachten, während der proximale Bereich der Hundekralle aus einem noch überwiegend ungerichteten Bindegewebe besteht. Ähnliche Befunde liefert auch ERNSBERGER (1998) für die Katzenkralle. Sie vergleicht die trajektorieell ausgerichteten kollagenen Fasern im distalen Teil der Wandlerhaut der Kralle mit der distalen, bindegewebigen Ausprägung des Hufbeinträgers des Pferdes (PELLMANN, 1995; HENKE, 1997).

Die durch das Körpergewicht des Tieres vorhandene Kraft, welche auf die Phalanx distalis des Hufes resp. der Klaue des stehenden Tieres wirkt, wird innerhalb des Zehenendorgans durch unterschiedliche Mechanismen in eine Vielzahl von Teilkräften aufgespalten (Textabb. 49). Dabei dient unter anderem der Huf- resp. Klauenbeinträger der Befestigung des distalen Zehengliedes. Ähnliche Verhältnisse gelten auch für die Kralle des Hundes. An der Kralle des Hundes kommt jedoch dem Halt des Krallenbeines während des Stehens weniger Bedeutung zu als dem Halt der Krallenplatte während der dynamischen Belastung, also des Laufens sowie des Scharrens und Grabens (Textabb. 50).

Die Druckkraft des Körpergewichtes wirkt an der Hundepfote auf das gesamte Ballensystem (der Hund ist ein Zehengänger), welches sich aus den Metakarpal- bzw. Metatarsalballen sowie den Zehenballen zusammensetzt. Im Bereich der Kralle hat der Zehenballen vornehmlich die Aufgabe, die Körperlast des Hundes tragen. Dem Krallenplattenträger kommt an der Hundekralle im Vergleich zum Hufbeinträger des Pferdes sowie zum Klauenbeinträger des Rindes nur bedingt eine Tragefunktion zu, da die Kralle nur bedingt Bodenkontakt hat. Im Gegensatz zur Katze, die ihre Krallen nur bei Gebrauch ausfährt, ist dennoch der Kontakt der Hundekralle mit dem Untergrund besonders beim Laufen durchaus zu berücksichtigen.

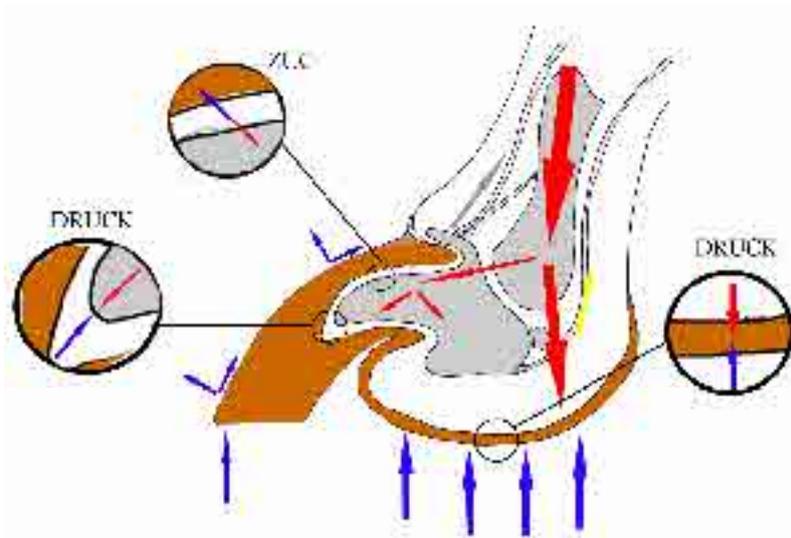


TEXTABBILDUNG 49:

Diese Abbildung zeigt ein stark vereinfachtes Schema über den Fußungsapparat der Rinderklaue. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur ein Teilbereich des Fußungsapparates dargestellt. Der gesamte Fußungsapparat bildet sich aus einer Vielzahl von Strukturen. Das Zusammenwirken aller Strukturen ist sehr komplex, multidirektional ausgerichtet und ließe sich damit nicht in einer einfachen Zeichnung darstellen.

Die blauen Pfeile stehen stellvertretend für die Bodenkräfte, die roten Pfeile für die entgegengesetzte Körpergewichtskraft. Die Körpergewichtskraft sowie die Bodenkraft werden in verschiedene Teilvektoren (kleinere rote sowie kleinere blaue Pfeile) aufgespalten. So bildet sich unter anderem der Zug auf die trajektorialen kollagenen Fasern des dermalen Teiles des Klauenbeinträgers (Ausschnitt linke Bildhälfte: Zug). Entsprechend entsteht ein Druck auf die Klauenspitze. Im Bereich des Stoßdämpfungsapparates des Fußungsapparates (rechte Bildhälfte) der Rinderklaue wird durch Kraft und Gegenkraft – Körpergewichtskraft und Bodenkraft – ein Druck erzeugt.

Die Zugrichtung der tiefen Beugesehne (gelber Pfeil) und der gemeinsamen Strecksehne (grauer Pfeil) sind durch die Pfeile nur angedeutet. Diese Kräfte beeinflussen die Richtungen der durch das Körpergewicht ausgeübten Zug- und Druckkräfte im Zehenendorgan zusätzlich.



TEXTABBILDUNG 50:

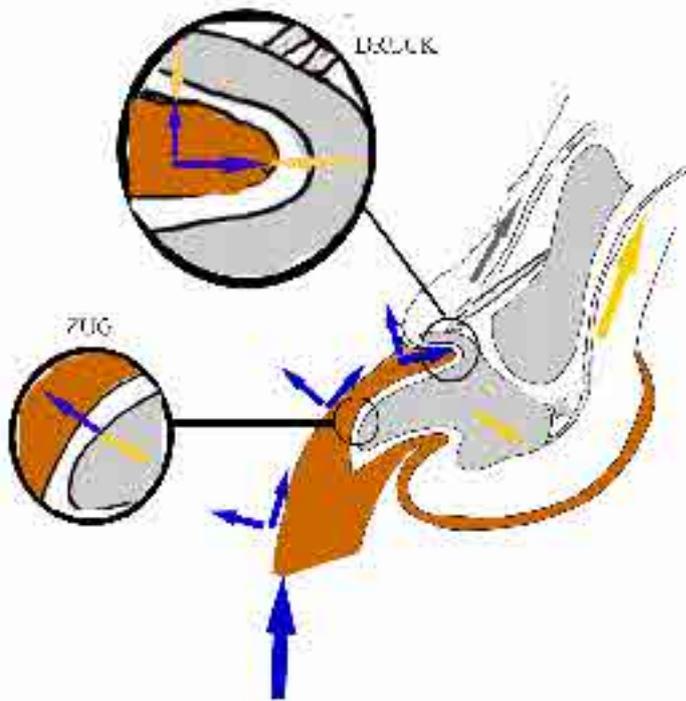
Diese Abbildung ist eine stark vereinfachte, schematische Darstellung des „Fußungsapparates“ der Hundekralle³⁰. Die Abbildung bezieht sich auf die Kräfte, welche durch das Körpergewicht (rote Pfeile) sowie den Gegendruck durch den Untergrund (blaue Pfeile) entstehen. Die Kräfte der Bänder und Sehnen sind durch die Pfeilspitzen nur angedeutet (gelber Pfeil = tiefe Beugesehne; grauer Pfeil = gemeinsame Strecksehne und dorsales Band). Während durch die Gewichtskraft in

Verbindung mit einem leichten Druck (Ausschnitt: Druck) vom Untergrund an der Krallenspitze ein Druck erzeugt wird, entsteht im Bereich des Krallenrückens auch am stehenden Tier ein leichter Zug (Ausschnitt: Zug). Der größte Teil der Körpergewichtskraft wird an der Hundekralle des stehenden Tieres jedoch auf den Zehen- und Mittelhandballen übertragen. Durch das Körpergewicht einerseits, sowie die vom Untergrund aufgebaute Gegenkraft andererseits entsteht ein Druck. Sind Kraft und Gegenkraft gleich groß, so steht das Tier ohne einzusinken auf dem Untergrund.

Beim GEBRAUCH DER KRALLE (Laufen, Graben) wirken an der Krallenspitze die vom Untergrund auftretenden Kräfte im Zusammenspiel mit der über das Krallenbein übertragenen Gegenkraft der tiefen Beugesehne. Da beide Kräfte entgegengesetzt wirken, entsteht ein Zug (Textabb. 51). Dieser führt dazu, dass sich die kollagenen Faserbündel des dermalen Teiles des Krallenplattenträgers in Zugrichtung ausrichten. Dabei scheint der Zug im Bereich des dorsolateralen Teiles der Krallenspitze besonders kräftig zu sein, da sich in diesem Krallenabschnitt besonders viele kollagene Faserbündel ausbilden. Die kollagenen Fasern an der Krallenbeinspitze orientieren sich entsprechend den Zugverhältnissen laterodorsal.

Entsprechend dieser hauptresultierenden Kräfteverhältnisse bilden sich auch der Papillarkörper sowie die Epidermis in diesen Krallenabschnitten aus (s.u.). Während ERNSBERGER (1998) in diesem Zusammenhang für die Katzenkralle das Vorhandensein eines epidermalen Teiles des Krallenplattenträgers verneint, ist ein solcher durchaus an der Hundekralle zu beschreiben (s.u.). Dieser besteht aus den epithelialen Blättchen des Wandsegmentes, welche die Übertragung der Bodenkraft an der dermo-epidermalen Grenzebene auf die kollagenen Fasern des bindegewebigen Teiles des Krallenplattenträgers bewirkt (s.u.)

³⁰ Genau wie das Schema für den Fußungsapparat der Rinderklaue, so zeigt auch dieses Schema nur eine stark vereinfachte Abbildung des „Fußungsapparates“ des Hundes. Mit dieser Darstellung sollen nur die prinzipiellen Kräfteverhältnisse an der Hundekralle aufgezeigt werden.

**TEXTABBILDUNG 51:**

Schematische Darstellung des „Fußungsapparates“ der Hundekralle während der Belastung des Grabens³¹. Die Abbildung bezieht sich auf die Kräfte, welche durch den Untergrund (blaue Pfeile) sowie die Gegenkraft, die tiefe Beugesehne (gelbe Pfeile) erzeugt werden. Die Körpergewichtskraft ist in dieser Abbildung nicht dargestellt.

Der Zug, welcher im Bereich des Krallenrückens schon am stehenden Tier entsteht, wird beim Graben noch verstärkt (Ausschnitt: Zug). Der proximale Krallenbereich (Ausschnitt: Druck) bekommt eine Widerlagerfunktion. Den proximodorsal orientierten Kräften, welche die Krallenplatte nach oben drücken, wirkt die durch die tiefe Beugesehne auf das Krallenbein ausgerichtete Kraft nach palmar/plantar entgegen. Der Krallenfalz verhindert damit eine Verlagerung der Krallenplatte.

Die ersten Gewichtskräfte wirken auf das Zehenendorgan mit der Geburt des Tieres auf dieses ein. Dies gilt für den Nestflüchter gleichermaßen wie für den Nesthocker. An der Kralle des Hundes entstehen diese ersten Kräfte im Bereich der Krallenplatte durch die ersten Berührungen der Krallenspitze sowie im Bereich des Zehenballens z. B. während des Tretens gegen das Gesäuge des Muttertieres zur Anregung des Milchflusses („Milchtritt“) während des Saugaktes. Mit den ersten Steh- und Gehversuchen nimmt die Belastung auf die Kralle zu. Dabei erfolgt die Kraftübertragung des Körpergewichtes beim Hund vornehmlich von der Phalanx media sowie dem distalen Zehengelenk senkrecht auf die Fußungsfläche. Die Phalanx distalis ist in einem 90° Winkel zur Phalanx media abgewinkelt und trägt damit nur zu einem geringen Teil zum Stoßdämpfungsapparat bei.

Mit zunehmendem Alter des Welpen werden die auf die Kralle einwirkenden Kräfte massiver. Diese kommen sowohl durch das zunehmende Körpergewicht des Tieres (Druck auf den Zehenballen) als auch durch die Berührung (Druck) der Krallentüte mit dem Boden während des Laufens oder Grabens zustande. Die trajektorieell ausgerichteten Kollagenfasern richten

³¹ Genau wie das Schema für den Fußungsapparat der Rinderklaue, so zeigt auch dieses Schema nur eine stark vereinfachte Abbildung des „Fußungsapparates“ des Hundes. Mit dieser Darstellung soll nur die prinzipielle Möglichkeit der Kraftverhältnisse an der Hundekralle aufgezeigt werden. Auf eine genaue Darstellung soll aus Gründen der Übersichtlichkeit hier verzichtet werden.

sich mit der Belastung dorsolateral aus und verankern insbesondere den distalen Teil der Krallenplatte mit dem Krallenbein.

Neben den bereits dargestellten Strukturen im Bereich der Krallenspitze verändert sich jedoch auch die Unterhaut im Bereich des Saumsegmentes. Auch diese Veränderung könnte als Anpassung an die entsprechenden Belastungsverhältnisse auf die Krallenplatte interpretiert werden. Während das Saumpolster an Rinderklaue und Pferdehuf eine abfedernde Wirkung der Huf- resp. Klauenplatte auf diesen Bereich des Zehenendorganes ausüben, könnte die Unterhaut des Saumsegmentes im Bereich der Hundekralle eher eine Widerlagerfunktion bekommen. Das Widerlager soll einer entsprechenden Überdehnung der Krallenplatte entgegenzuwirken. Um diesem Zweck auch mit zunehmender Belastung und wachsendem Körpergewicht des Tieres optimal gerecht zu werden, könnte die Ausbildung der knöchernen Krallenleiste in diesem Krallenabschnitt an der Kralle eines adulten Hundes erklärt werden.

Dazu erfährt die Kralle durch die Ausbildung der knöchernen Krallenleiste eine größere Ansatzfläche für die Ligamenta dorsalia sowie die gemeinsame Strecksehne, welche in Anlehnung an den Klauenbeinträger des Rindes nach WESTERFELD (2003) auch zum Fußungs- und Trageapparat gehören. In wieweit sich die knöcherne Krallenleiste in ihrer Ausbildung bei Hunderassen, die mehr laufen, sowie Hunden, die mehr graben, verändert, ist durch weitere Untersuchungen abzuklären.

Entsprechend zu den Verhältnissen an der Katzenkralle werden auch die durch die tiefe Beugesehne sowie durch die Bänder an der Hundekralle ansetzenden Zugkräfte den Krallenplattenträger mit beeinflussen (BRUHNKE, 1931, ERNSBERGER, 1998).

Durch das zunehmende Gewicht des Tieres sowie durch die zunehmende Belastung wirken auch auf den Zehenballen stärkere Kräfte ein. Darauf reagiert der Zehenballen („Stoßdämpfungsapparat“) mit der Einlagerung von Polsterfett. Das Fettgewebe lagert sich in das sich ausbildende Netzwerk aus dicken kollagenen sowie kurzen elastischen Faserbündeln ein (TRAUTMANN, 1949). RÄBER (2000) hat diese strukturellen Veränderungen für das Ballensegment der Rinderklaue untersucht. Durch die spezielle Anordnung von Polsterkammern in der Subkutis wird auch an der Hundekralle die vertikale Kraft auf natürliche Weise abgedämpft und damit die Lederhaut im Bereich der Fußungsfläche nicht traumatisiert.

Der Stoßdämpfungsapparat an der Kralle des Hundes ähnelt daher sehr dem der Klaue des Rindes (WESTERFELD, 2003). Mit der zunehmenden Aufrichtung der Gliedmaße ändert sich bei den homologen Zehenendorganen jedoch auch die Belastung der einzelnen Bereiche innerhalb des Zehenendorganes. Während das Körpergewicht beim Hund vorwiegend auf den

Metatarsal-/Metakarpalballen sowie den Zehenballen lastet, ruht dieses beim Rind auf dem Tragrand der Klauenkapsel, auf der halbmondförmig gestalteten Klauensohle sowie auf dem Ballenwulst und dem distalen Abschnitt des Ballensegmentes (MÜLLING, 1993 u. 1999). Das Pferd als Zehenspitzenrandgänger fußt hingegen überwiegend auf dem Tragrand der Hufplatte, die von Kron- und Wandhorn gebildet wird. Die dorsal gewölbte Sohle zwischen dem Tragrand und dem Strahl wird nur in tiefem Geläuf belastet, genauso wie das Strahl-Ballensegment des Pferdehufes. Dieses Strahl-Ballensegment ist charakterisiert durch sein mächtiges Subkutispolster, welchem eine stoßbrechende Wirkung zugesprochen wird (HABERMEHL, 1996; APPELBAUM, 2001).

FUNKTION DES SEGMENTSPEZIFISCHEN PAPILLARKÖRPERS

Die FORM DES PAPILLARKÖRPERS wird durch seine Funktion bestimmt, welche er innerhalb der einzelnen Krallenabschnitte zu erfüllen hat. Daraus ergibt sich für jedes Segment die Notwendigkeit der Ausformung eines segmentspezifischen Papillarkörpers.

Wie die Untersuchungsergebnisse zur prae- und perinatalen Papillarkörperentwicklung in der Kralle sowie in den Krallen adulter Hunde zeigen, ist dieser Entwicklungsvorgang nie vollständig abgeschlossen, sondern steht in einem ständigen Prozess der Anpassung.

Der Papillarkörper der Kralle des Hundes hat einerseits eine entscheidende Bedeutung für die Ernährung der Krallenepidermiszellen und dient andererseits der dermo-epidermalen Verankerung. Diese beiden Funktionen sind entscheidend für die Entwicklung der dermo-epidermalen Grenzfläche zum dreidimensionalen Papillarkörper, deren Ziel ist, eine kurze Diffusionsstrecke und größtmögliche Diffusionsfläche zwischen Kapillaren und Epidermiszellen herzustellen sowie eine der mechanischen Belastung der Kralle entsprechende optimale Verbindung von Krallenbein und Krallentüte herzustellen.

Als Papillarkörperformen treten an der Kralle des Hundes neben einer glatten dermo-epidermalen Oberfläche Leisten, Blättchen und Papillen auf.

Besonders hervorzuheben sind an der Kralle eines Hundes im Perinatalstadium die dermalen Blättchen des Wandsegmentes. Einen blättchenförmiger Papillarkörper findet man in Arealen, in denen eine auf Zug belastbare dermo-epidermale Verbindung im Vordergrund steht (MÜLLING, 1993). Der Grad der Ausbildung der Blättchen spiegelt dabei den Grad der mechanischen Belastung wider. Dementsprechend sind an der Rinderklaue im Bereich des Wandsegmentes nur primäre Blättchen zu finden, während am Pferdehuf neben Primär- auch

Sekundärblättchen auftreten, was auf eine stärkere Belastung in diesem Abschnitt deutet (PELLMANN, 1995). In Übereinstimmung mit den Befunden von PELLMANN (1995) über den Hufbeinträger sowie WESTERFELD (2003) über den Klauenbeinträger stellt die dermo-epidermale Grenzfläche des blättchenförmigen Papillarkörpers die Verbindung zwischen dem dermalen und dem epidermalen Teil des Krallenplattenträgers her. Mit der Belastung der Kralle (z. B. beim Graben) richten sich die Blättchen und damit auch die kollagenen Fasern entsprechend der dermo-epidermalen Oberfläche dorsodistal aus.

Die unterschiedliche Kraftverteilung auf den Bereich der Krallenspitze spiegelt sich in der Ausbildung der Länge und Breite der Lederhautblättchen wider. Die Kraft im Bereich des dorsalen Teiles des Zehnrückens muss auf einen kurzen Bereich verteilt werden, dadurch bilden sich in diesem Krallenabschnitt kurze, aber einer breiten Basis aufsitzende, spitz zulaufende Blättchen aus. Die Druckkraft vom Untergrund, welche auf die Seitenteile der Krallenplatte wirkt, hat zur Folge, dass sich dünne, lange, laterodorsal orientierte, einer schmalen Basis aufsitzende Blättchen ausbilden.

Die fehlende Ausbildung von Blättchen im Bereich des Krallenrückens ist durch die Ausbildung des Rückenwulstes zu erklären. Dieser ersetzt die Blättchen, indem er der Krallenplatte im dorsolateralen Bereich durch die lateralen Einziehungen einen zusätzlichen Halt bietet.

Die AUSPRÄGUNG DES RÜCKENWULSTES, von SIEDAMGROTZKY (1870) und ZIETZSCHMANN (1918) auch als große Lederhautpapille diskutiert, variiert an der Hundekralle stark und ist an der Katzenkralle weitaus prägnanter ausgebildet (ERNSBERGER, 1998). Während er an der Kralle des Hundewelpen als kräftiger Lederhautwulst in Erscheinung tritt, befindet sich an der adulten Hundekralle häufig nur noch ein schmaler Streifen, ohne deutliche Abgrenzung zum Wandsegment. Die Funktion des Rückenwulstes wird in der Literatur als Verankerungsmechanismus für die Krallentüte beschrieben (SIEDAMGROTZKY, 1870; ZIETZSCHMANN, 1918). Die Ausprägung des Rückenwulstes scheint demnach durch seine Widerlagerfunktion stark funktionell abhängig zu sein. Katzen, die ihre Krallen zum Klettern nutzen, brauchen einen kräftigeren Rückenwulst, da sie mit ihren Krallen teilweise das ganze Körpergewicht halten müssen. Ein Verankerungsmechanismus in Form eines rein blättchenförmigen Papillarkörpers reicht hier nicht aus. Zum besseren Halt bildet sich ein hohes, schmales Gebilde aus, wobei die konkave Einziehung des Rückenwulstes am Übergang zum Wandsegment zusätzlichen Halt für die Krallenplatte bieten dürfte. Hunden ist es mit ihren stumpfen, abgerundeten Krallen nicht

möglich zu klettern. Entsprechend können Hunde jedoch ihre Krallen zum Graben und Scharren einsetzen. Diese, zur Katzenkralle doch recht unterschiedliche Funktion bedingt die eher breite niedrige als schmale hohe Form des dermalen Rückenwulstes. Gerade im Krallenspitzenbereich bilden die lateralen konkaven Einbuchtungen an der Basis des Rückenwulstes ein gutes Widerlager für die beim Graben auf die Krallenplatte wirkenden Kräfte. Demzufolge kann der Rückenwulst auch als ein Teil des Krallenplattenträgers angesehen werden. Die starke Ausprägung des Rückenwulstes der Welpenkralle dient einer besseren Verankerung der Epidermis der noch nicht vollständig entwickelten Kralle. Mit der weiteren Entwicklung vom Welpen zum juvenilen Alter kommt es auch zu einer weiteren Entwicklung des Krallenbeines. Die vollständige Ausbildung des Krallenbeines führt wohl zu einer verstärkten Stabilität der Kralle, woraufhin die Funktion des Rückenwulstes in den Hintergrund gedrängt werden könnte.

Die Umbildung des Rückenwulstes an den hier exemplarisch untersuchten Krallen adulter Hunde könnte weiterhin mit einer Einschränkung der Funktion der Kralle zu tun haben. Schon GÜCKEL (1922) unterscheidet Hunde, die ihre Krallen zum Graben einsetzen und einen deutlichen Rückenwulst aufweisen, von Hunden, die mehr laufen und deren Krallen einen weniger starken Rückenwulst ausprägen. Zu untersuchen wäre hier weiterhin neben der rasse-spezifisch unterschiedlich ausgeprägten Funktion auch der Einfluss von Alter und Gewicht des Tieres auf den Aufbau der Kralle.

Die Papillen im Kron-, Sohlen- sowie terminalen Abschnitt des Wandsegmentes erfüllen durch die Vergrößerung der dermo-epidermalen Kontaktfläche primär die Funktion der Verbesserung der Diffusion von Nähr- und Baustoffen in die Krallenepidermis und dienen erst sekundär dem mechanischen Zusammenhalt von Ober- und Lederhaut. Alle diese Abschnitte zeichnen sich durch eine hohe Hornbildungsrate aus. Damit ist die gefäßlose Epidermis besonders auf eine ausreichende Nährstoffzufuhr angewiesen. Diese wird durch die Ausprägung von dermalen Papillen gewährleistet. Durch die Papillen kommt es einerseits zu einer erheblichen Oberflächenvergrößerung, andererseits wird die Diffusionsstrecke zur nächstliegenden Kapillare deutlich verkürzt. Dieses wird zwar auch schon durch die Ausbildung von Leisten und Blättchen erreicht, doch wird der Abstand zur nächstliegenden Kapillare durch die Ausprägung von Papillen nochmals reduziert und damit die Ernährung dieses Gebietes weiter optimiert. Die dorsale Ausrichtung der Papillen im proximalen Teil des Kronsegmentes der perinatalen Hundekralle steht entgegen der dorsodistalen Ausrichtung der Papillen von Huf und Klaue, wie sie in der Literatur dargestellt wird. Diese hängt mit der Größe der Papillen sowie von deren Belastung ab. Während die Kronpapillen der Hundekralle

sehr klein sind, sind Huf- sowie Klauenpapillen im Kronsegment viel länger. Die Größe der Papillen hat für Huf und Klaue neben der Ernährungsfunktion auch einen weiteren Einfluss auf die Ausdifferenzierung der Epidermiszellen und die Architektur des Hornzellverbandes (BRAGULLA u. HIRSCHBERG, 2003). Dementsprechend entwickeln Huf und Klaue innerhalb der Epidermis Kronhornröhrchen, die eine entscheidende Bedeutung für den Hufbein- bzw. Klauenbeinträger haben. Die Ausrichtung der Kronpapillen von Huf und Klaue entspricht der Wachstumsrichtung der Kronepidermis.

Die Sohlenpapillen der Hundekralle entwickeln wie die Sohlenpapillen von Huf und Klaue von distal nach proximal. Dies entspricht der höheren Hornbildungsrate sowie der höheren Belastung in diesem Abschnitt des Sohlensegmentes der Hundekralle. Der rein blättchenförmige Papillarkörper der Katzenkralle spiegelt wiederum die höhere mechanische Belastung wider. Auch hier wirken durch das Klettern starke Zugkräfte auf das Sohlensegment. Eine Umformung der Leisten in Papillen wäre bei der Katze aufgrund der Funktion demnach kontraindiziert, da Lederhautblättchen Zugkräfte besser übertragen können als Lederhautpapillen, wie der blättchenförmige Papillarkörper im Wandsegment der Klaue und insbesondere derjenige im Wandsegment des Pferdehufes zeigen. Eine Zugbelastung des Sohlensegmentes entfällt an der Hundekralle, statt dessen steht eine hohe Hornbildungsrate als Schutz der Kralle beim Graben und Laufen im Vordergrund.

Im Bereich des Ballensegmentes besteht eine sehr dicke und stark verhornende Epidermis. Um diese vollständig und ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen, ist es nötig, die dermoepidermale Oberfläche wiederum dahingehend zu modifizieren, dass die kleinste Diffusionsstrecke zwischen Blutgefäßen und keratinisierender Epidermis hergestellt wird. Um diese Funktion und eine große Flexibilität für die Ausdehnung des Zehenballens während der Belastung der gesamten Gliedmaße erfüllen zu können (mechanische Komponente), ist ein ausgeprägter Papillarkörper im Bereich des Zehenballens von Vorteil.

Abschließend sei auch für die segmentspezifische und lokale Ausprägung des Papillarkörpers hervorgehoben, dass dieser immer nur im funktionellen Zusammenhang mit der Ausprägung der beiden anderen Hautschichten zu sehen ist. Wie schon RÄBER (2000) für das Ballensegment an der Rinderklaue beschreibt, so bildet die Segmentierung innerhalb der Unterhaut des Ballensegmentes mit dem Papillarkörper eine optimale funktionelle Einheit. Die eigenen Befunde zur Entwicklung der Hundekralle zeigen, dass dies auch für die anderen Segmente der Kralle zutrifft.

FUNKTION DER KRALLENEPIDERMIS

Die Epidermis erfüllt verschiedene mechanische, physikalische und chemische SCHUTZFUNKTIONEN. Dieses gilt für die unmodifizierte Oberhaut der behaarten Haut und insbesondere für diejenige des Zehenendorgans. Abhängig von der Entwicklungsphase des Foetus kommt es zu einer segmentspezifischen Ausbildung der Epidermis. Dabei hat die Epidermis des Zehenendorgans gerade während der pränatalen Entwicklung zwei Aufgaben zu erfüllen. Einerseits muss sich das Epithel so weit ausdifferenzieren, dass es postnatal funktionsfähig ist, andererseits darf es nicht so hart und kantig sein, dass es Eihäute und Geburtskanal verletzen könnte. Um diese Funktionen erfüllen zu können, entstehen die unterschiedlichen Epithelgenerationen. Die toten Zellmassen der dritten Epithelgeneration bilden an der Kralle über der nachfolgenden Epithelgeneration ein dickes Schutzpolster aus toten Zellmassen. An der perinatalen Hundekralle liegt dieses im Bereich der Krallenspitze und der Krallensohle. Das entspricht auch den Angaben von ERNSBERGER (1998) für die Kralle neugeborener Katzen. Im Gegensatz dazu werden die toten Zellmassen an Huf (BRAGULLA, 1996) und Klaue (BRAGULLA et al., 1997) von allen Segmenten gebildet. Auch an der Hundekralle gibt es eine Beteiligung des lateralen Teiles des Wandsegmentes an der Bildung der aus toten Zellen bestehenden Schutzhülle der Kralle. Dabei legen sich die verhornten Zellen des Wandsegmentes als dünnes, stark azidophiles Schutzband über die lockeren toten Zellmassen des Sohlensegmentes. Die toten Zellmassen können entsprechend der homologen Zehenendorgane als „HINFÄLLIGE KRALLENKAPSEL“ angesprochen werden. Dieser Begriff wurde von BRAGULLA als „hinfällige Hufkapsel“ für die hinfälligen Zellmassen am Pferdehuf (1991) sowie an der Rinderklaue (1997) als „hinfällige Klauenkapsel“ (*Capsula ungulae decidua*) geprägt und von ERNSBERGER (1998) als „hinfällige Krallenkapsel“ für die hinfälligen Zellmassen an der Katzenkralle übernommen. Die Ausbildung eines Stratum granulosum vor der Bildung der „hinfälligen Krallenkapsel“ kann im Gegensatz zu den homologen Zehenendorganen Huf (BRAGULLA, 1996), Klaue (BRAGULLA et al., 1997), Katzenkralle (KATO, 1977; ERNSBERGER, 1998) und Fingernagel (HASHIMOTO, 1966) an dem eigenen Untersuchungsmaterial der Hundefoeten nicht verzeichnet werden. ERNSBERGER (1998) bezeichnet die Epithelzellmassen nicht als Hornzellen, sondern nur als tote Zellmassen, weil die Zytokeratine in diesen Zellen nicht durch intermediärfilamentassoziierte Proteine und durch Disulfidbrücken während der Keratinisierung verbunden werden, was zur Bildung einer Hornzelle notwendig sei. Für die homologen Zehenendorgane trifft dieses nicht zu. An Huf und Klaue entspricht die „hinfällige Huf- bzw. Klauenkapsel“ einer Hornschicht. Inwieweit es sich an der Hundekralle um

vorzeitig abgestorbene, nur keratinisierte Zellen oder Hornzellen handelt, ist mit den hier angewandten Untersuchungsmethoden nicht abschließend zu klären und müsste genauer untersucht werden.

Die Funktion der hinfalligen Krallen- resp. Huf- und Klauenkapsel liegt, wie bereits oben erwähnt, im Schutz der Fruchthüllen und des Geburtsweges sowie auch zum eigenen Schutz vor Verletzungen. So stellt sich die Frage, warum die „hinfallige Krallenkapsel“ bei Hund und Katze nur an der Krallenspitze und der Krallensohle ausgebildet ist, während sie bei homologen Zehenendorgane von allen Segmenten gebildet wird. Diese Frage impliziert, dass die hinfallige Krallenkapsel wirklich nur von der Krallensohle sowie von einem Bereich der Krallenwand gebildet wird. Inwieweit die hinfallige Krallenkapsel im Bereich der anderen Segmente nicht nur durch die Bearbeitung der Präparate verloren gegangen ist und vielleicht doch, wenn auch nur ganz dünn – wie im Saumsegment des foetalen Pferdehufes – von allen Segmentabschnitten gebildet wird, bleibt offen. Doch gerade die Krallenspitze sowie der Krallenplattenrand, als sehr spitze bzw. scharfkantige Teile, bedürfen einer besonderen Abdeckung zum Schutz der Fruchthüllen, weshalb die Ausbildung der hinfalligen Krallenkapsel im Wand- und Sohlensegment besonders notwendig ist.

Die unterschiedlichen Funktionen der permanenten Epidermis in den verschiedenen Abschnitten des Zehenendorganes – hier der Hundekralle – benötigen und/oder bewirken auch eine unterschiedliche strukturelle Anpassung. Als Anpassungsmechanismus steht der Epidermis dabei unter anderem die Möglichkeit einer harten oder weichen Verhornung offen. An der Hundekralle zeichnen sich die Krallenepidermisabschnitte, welche durch einen weichen Verhornungsmodus keratinisieren und verhornen, durch eine eher weiche, elastische oder bröckelige Konsistenz aus, während die Abschnitte, welche über einen harten Verhornungsmodus ausdifferenzieren, eher fest und kompakt sind. Dementsprechend bilden Kronsegment und Wandsegment die Krallenplatte mit einem festen, harten Horn. An der Krallensohle ist das Horn weich und bröckelig und füllt nur den Raum zwischen den Seitenteilen der Krallenplatte aus. Dies ermöglicht der Krallenplatte eine bessere Flexibilität an ihrem Rand, da sie palmar nicht durch ein starres System gehalten wird, sondern in einem gewissen Maße laterolateral zusammen- sowie auseinandergedrückt werden kann. Die Zehenballenoberhaut muss wiederum weich und elastisch sein, damit sie im Zusammenwirken mit Leder- und Unterhaut eine Stoßkissenfunktion erfüllen kann. Ein hartes Horn wie an der Krallenplatte würde die Elastizität in diesem Krallenabschnitt einschränken, wodurch die Stoßkissenfunktion der gesamten modifizierten Ballenhaut nicht möglich wäre.

Die PERMANENTE EPIDERMIS der homologen Zehenendorgane differenziert sich auch entsprechend der funktionellen Anforderungen. Aufgrund dieser ist zu erklären, warum teilweise in den einzelnen Segmenten ein unterschiedlicher Verhornungsmodus auftritt. Die Epidermis von Huf und Klaue erscheint viel spezialisierter als diejenige der Kralle. Daher bilden sich funktionelle Einheiten, die in dieser Form an der Hundekralle im Perinatalstadium nicht anzutreffen sind. Als Beispiel soll hier nur die Ausbildung der Kronhornröhrchen erwähnt werden. Der epidermale Teil des Huf- resp. Klauenbeinträgers übernimmt dabei die Funktion, die Körpergewichtskraft des Tieres auf den Untergrund zu leiten. Hier steht dieser Kraft die Gegenkraft des Untergrundes gegenüber, es entsteht eine Druckbelastung. Durch eine optimale Kräfteverteilung und Aufgliederung bilden dermaler und epidermaler Teil des Huf- resp. Klauenbeinträgers eine funktionelle Einheit. Durch die Ausbildung von Hornröhrchen und Zwischenhornröhrchen sowie deren Umschlingung von langen Hornzellen primärer Blättchen wird dies optimal umgesetzt (PELLMANN, 1995). Dieser Differenzierungsprozess ist innerhalb der Epidermis von Krone und Wand am Pferdehuf (Zehenspitzenrandgänger) noch weiter fortgeschritten als an der Rinderklaue (Zehenspitzen-gänger). In der Kralle des Hundes fehlt die Ausbildung der Hornröhrchen ganz, womit der Krallenplattenträger auf die epithelialen Blättchenstrukturen des Wandsegmentes reduziert ist. Das Fehlen der Hornblättchen sowie von Kronhornröhrchen an der Hundekralle könnte einerseits mit dem geringeren Gewicht der Tiere und damit einer geringeren Belastung zusammenhängen, andererseits spielt natürlich auch die unterschiedliche Kraftverteilung für die Modifikation der Epidermis eine Rolle. Eine Ausbildung dieser Strukturen erscheint an der Hundekralle dementsprechend nicht nötig zu sein.

Die von SEIDEL (1992) beschriebenen Kronhornröhrchen der Hundekralle könnten wiederum mit dem Alter, der Rasse sowie dem Gewicht der Tiere zusammenhängen, denn bei schweren, älteren Tieren ist die Belastung durchaus stärker als bei Welpen oder jüngeren, leichtgewichtigeren Tieren.

Aufgrund der fehlenden Ausbildung von Hornblättchen sowie von Kronhornröhrchen ist nach den eigenen Befunden im Gegensatz zu den Befunden von SEIDEL (1992) auch an der Hundekralle im Perinatalstadium keine „weisse Linie“ zu beobachten, wie sie für die Rinderklaue und den Pferdehuf charakteristisch sind. Das im terminalen Teil des Wandsegment gebildete, die Krallenplatte mit dem bröckligen Sohlenhorn verbindende Horn entspricht dem Horn der weißen Linie, auch wenn diesem Terminalhorn des Wandsegmentes der Hundekralle die für das Terminalhorn von Klaue und Huf typische Struktur fehlt.

5.6 PHYLOGENESE DES ZEHENENDORGANES

Als phylogenetische Urform des Zehenendorganes wird von den meisten Autoren die Kralle angesehen (BOAS, 1894; ZIETZSCHMANN, 1918, SEIFERT, 1942; ERNSBERGER, 1998). Allerdings bestehen bis heute noch Unstimmigkeiten über die eigentliche Entstehung der Amniotenkralle.

BOAS (1894) und ZIETZSCHMANN (1918) leiten die Kralle der Amnioten von einer einfachen, allseitig gleich gestalteten Kegelschuppe an der Zehenspitze landlebender Wirbeltiere ab. Die an der Kralle eines Säugers oder Reptils auftretenden Differenzierungen sind lediglich sekundäre Umbildungen aufgrund ihrer Lage und Funktion. Dem gegenüber sehen GEGENBAUR (1885) und GÖPPERT (1898) die Strukturen innerhalb der Kralle als voneinander unabhängige Bauteile an. Mit Verweis auf die schon bei den Amphibien vorhandene Ausbildung einer Krallenform behauptet GÖPPERT (1898), dass sich die Kralle demzufolge nicht von der Kegelschuppe, wie von BOAS (1894) angenommen, ableiten lässt. Dieser Auffassung von GÖPPERT (1898) aufbauend auf der Meinung von GEGENBAUR (1885) schließt sich auch SEIFERT (1942) an. SEIFERT (1942) zieht bei einer vergleichend-morphologischen Analyse zum Aufbau der Kralle den Schluss, dass die Elemente der Krallensohle sowie der Krallenplatte als getrennte Strukturen zu betrachten seien. Dabei geht der Autor sogar so weit, dass er die Terminallagen, das Terminalhorn von Huf und Klaue, an der Krallenspitze der Krallensohle und nicht, wie überwiegend allgemein üblich angenommen, der Krallenwand zurechnet.

Ungeachtet dieses Streitpunktes über die stammesgeschichtliche Entwicklung der Kralle bei Amphibien und Reptilien wird überwiegend die Auffassung vertreten, dass die Kralle als Grundform der Zehenendorgane der Säugetiere zu betrachten ist (BOAS, 1894; BRUHNS, 1910; ZIETZSCHMANN, 1918, SEIFERT, 1942; SEIDEL, 1992; ERNSBERGER, 1998). Diese Annahme vorausgesetzt, hat schon ERNSBERGER (1998) versucht, unter den Krallen von Hund und Katze die phylogenetisch ursprünglichere Krallenform zu ermitteln. Als Bestätigung der phylogenetischen Ursprünglichkeit der Säugerkralle im Vergleich zu den homologen Zehenendorganen Huf und Klaue sowie als Beurteilungskriterium für die Differenzierung zwischen der Hunde- und der Katzenkralle hat ERNSBERGER (1998) den Grad der Aufrichtung der Gliedmaße einerseits sowie den Ausformungsgrad des dermalen Papillarkörpers andererseits herangezogen. Die eigenen Befunde an der Hundekralle bestätigen die Angaben von ERNSBERGER (1998), dass die Katzenkralle die phylogenetisch ältere Krallenform ist. Für die phylogenetische Zuordnung dienen neben der Aufrichtung der Glied-

maße und der Ausformung des Papillarkörpers noch weitere Merkmale, wie die Differenzierung der Unterhaut und die Modifikation der Epidermis.

Die Aufrichtung der Gliedmaße erfolgt von der Katze – sie läuft auf dem Zehenballen und die Kralle berührt dabei nie den Boden – über den Hund, hier hat die Kralle mit der Spitze schon teilweise Bodenkontakt – zum Rind als Zehenspitzenwandler und als letztes zum Pferd, dem Zehenspitzenrandwandler. Entsprechend dieser Aufrichtung der Phalanx distalis erfolgt auch ein „Verstreichen“ der Saumfalte (Katze und Hund) zum Saumwulst (Pferd und Rind). In Anpassung an die unterschiedliche Belastung des Zehenendorgans von der Katze über den Hund zum Rind und Pferd kommt es nun in den einzelnen Hautabschnitten der Segmente zu mehr oder weniger weitgehenden spezifischen Modifikationen.

Als Beispiel sei hier nur der „Fußungsapparat“ der homologen Zehenendorgane erwähnt. Während die Ausbildung von Krallenplattenträger und Stoßdämpfungsapparat an der Kralle als noch zwei weitgehend unabhängige Strukturen anzusehen sind, bilden diese Strukturen von der Klaue zum Huf eine immer engere funktionelle Einheit. Aufgrund der Aufrichtung des Zehenendes kommt es zu unterschiedlichen Belastungsausmaßen, die wiederum eine unterschiedliche Differenzierung der einzelnen Segmentabschnitte nach sich ziehen. Als eine solche Anpassung ist auch der epidermale Teil des Klauen-, bzw. Hufbeinträgers anzusehen, der nach den eigenen Befunden an der Hundekralle, sowie nach den Befunden von ERNSBERGER (1998) an der Katzenkralle, in Form des Krallenbeinträgers nur wenig spezialisiert ist.

Die Abgrenzung zwischen der Hunde- und der Katzenkralle lässt sich am deutlichsten anhand der Ausbildung des segmentspezifischen Papillarkörpers demonstrieren. Neben der Ausbildung des dermalen Rückenwulstes gibt es auch deutliche Unterschiede in der Ausdifferenzierung des segmentspezifischen Papillarkörpers dieser beiden Fleischfresserkrallen.

Geht man davon aus, dass die Reptilienkralle die phylogenetisch ältere Form der Kralle ist – Säugetiere haben sich aus bestimmten Reptilien entwickelt –, so könnte sich der Rückenwulst der Fleischfresserkralle dadurch aus der Kronsegmentfalte der Reptilienkralle differenzieren haben, dass diese Falte dorsal in der Längsachse der Zehe distal wuchs. Dementsprechend ist dieser an der phylogenetisch ursprünglicheren Säugerkralle – der Katzenkralle – noch weitaus deutlicher ausgeprägt, als an der Hundekralle. Wird nun in einem weiteren Schritt davon ausgegangen, dass sich die Lederhautblättchen und -papillen aus ursprünglichen Leisten differenzierten (KUNSIEN, 1882; DIRKS, 1985; BRAGULLA, 1996), so ist auch zu erklären, weshalb der Papillarkörper der Katzenkralle im Sohlensegment nur aus Leisten

besteht, derjenige in der Hundekralle schon aus Papillen und Leisten sowie der im Sohlensegment der Rinderklaue und des Pferdehufes überwiegend aus Papillen, die noch auf niedrigen Lederhautleisten entspringen.

Als weiteres Differenzierungsmerkmal zwischen der Hunde- und der Katzenkralle sollte schlussendlich noch das Abwetzen/Abschilfern von Hornhülsen an der Katzenkralle erwähnt werden. Geht man auch hier wiederum davon aus, dass sich die Säugerkralle aus der Reptilienkralle und diese aus einer Hautschuppe entwickelt, so erinnert das Abschilfern der Hornhülsen an das Häuten der Reptilienhaut und ist ein weiteres Argument für die Auffassung, dass die Katzenkralle die phylogenetisch ältere Krallenform ist.

5.7 Klinische Bedeutung der Hundekralle

Die Kralle ist eine Hautmodifikation, welche in der Klinik oft vernachlässigt wird und der erst bei deutlich augenscheinlichen, also klinisch apparenten Problemen Beachtung geschenkt wird. Doch Studien am menschlichen Nagel (NICOLOPOULOS et al., 2002) sowie am Pferdehuf (PELLMANN et al., 1993) und an der Rinderklaue (WESTERFELD, 2003) zeigen, dass gerade das Zehenendorgan ein wichtiger Indikator für systemische Erkrankungen sein kann. Neben nutritiven Störungen können diese auch toxischen oder bakteriellen Ursprungs sein. Eine frühzeitige Berücksichtigung der Kralle könnte auch hier eine Früherkennung einiger Systemerkrankungen ermöglichen. Neben der Früherkennung von Krankheiten soll die erneute anatomisch-histologische Betrachtung der Entwicklung der Hundekralle weitere Anstöße über Behandlungsansätze geben, da bis heute in den meisten Fällen nur eine Amputation des distalen Zehengliedes als Behandlungsmethode der Wahl beschrieben wird (MUELLER u. OLIVRY, 1999). Während einer Krallenerkrankung können mehrere Gewebe betroffen sein, z. B. Dermis und Epidermis bei einer Grenzflächendermatitis (MULLER et al., 1993), oder alle drei Hautschichten nach einem Trauma oder sie beschränkt sich auf spezifische Strukturen innerhalb eines Gewebes, z. B. Vasculitis bei einem Lupus erythematodes (MULLER et al., 1993 b). Wie bereits angedeutet, entstehen Krallenveränderungen häufig im Zuge einer systemischen Erkrankung oder als separate Erkrankung der Krallen und sind in allen Altersklassen anzutreffen (Foetus, Welpen, juveniler sowie adulter Hund). Ursachen einer Krallenerkrankung können hereditär, infektiös, neoplastisch, autoimmunologisch, parasitär sowie traumatisch bedingt sein (LETTOW et al., 1988; MULLER et al., 1993 b).

Detaillierte Kenntnisse des anatomisch-histologischen Aufbaues der Hundekralle bieten die Grundlage für eventuelle neue Ansatzpunkte einer Krallenbehandlung. Dabei sind Kenntnisse

über die Entwicklung der Hundekralle von besonderer Bedeutung. Wie Arbeiten an den homologen Zehenendorganen – menschlicher Nagel (FISTAROL, et al., 2002; FREEDBERG et al., 2001), Pferdehuf (MARKS, 1984; BUDRAS u. HUSKAMP, 1990, 1995) und Rinderklaue (BRAGULLA u. MÜLLING, 1997) – zeigen, spielen sich während eines Regenerations- sowie Reparatursprozesses ähnliche Prozesse ab wie bei der foetalen Entwicklung des selbigen Organes. Durch die Kenntnisse über die Regenerations- sowie Reparatursprozesse der homologen Zehenendorgane lassen sich diese Prozesse nun auch auf die Hundekralle übertragen. Das Verständnis der Entwicklungsprozesse liefert demzufolge einen weiteren Einblick über Regenerations- sowie Reparatursprozesse von erkrankten Krallen adulter Hunde. Mit diesem Wissen können Krankheitsstadien neu bestimmt, sowie Prognosen für eine Heilung erstellt werden. Aber auch pathologische Strukturen – wie sie MARKS (1985) beim „Strahlkrebs“ des Pferdehufes beschreibt – könnten auf foetale sowie perinatale Entwicklungsstufen zurückgeführt und so neu zugeordnet werden.

Nach den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich die Kralle des Hundes aufgrund ihrer prae- und perinatalen Entwicklung in ein Saum-, Kron-, Wand-, Sohlen- und Ballensegment untergliedern. Der für die Fleischfresserkralle typische Rückenwulst ist dabei dem Kronsegment zuzurechnen. Durch eine exakte Definition der Unterhaut wird aufgezeigt, dass sich in allen Segmenten eine Unterhaut entwickelt, deren Ausprägung jedoch stark funktionsabhängig ist und daher neben der typischen Struktur eines lockeren, faserarmen Bindegewebes funktionsbedingt auch verknöchern kann.

Ferner bestätigen die Befunde zum anatomisch-histologischen Aufbau der Hundekralle im Zuge der prae- und perinatalen Entwicklung, dass die Säugetierkralle als die phylogenetische Urform der Zehenendorgane des Säugers angesehen werden kann, die Hundekralle jedoch im Vergleich zur Katzenkralle als die weiter entwickelte Krallenform zu gelten hat.