

## **2. LITERATURÜBERSICHT**

### **2.1 ALLGEMEINE DEFINITION DER ZEHENENDORGANE**

Die Zehenendorgane bedecken den apikalen Teil der distalen Phalanx (SIEDAMGROTZKY, 1870). Als SPEZIFISCHE HAUTMODIFIKATION an der Spitze der Gliedmaße setzen sie sich aus den drei Schichten Oberhaut (Epidermis), Lederhaut (Dermis bzw. Korium) und Unterhaut (Subkutis bzw. Tela subcutanea) zusammen.

Während der Phylogenese haben sich aufgrund von Adaptationsprozessen an die jeweiligen Lebensweisen und Funktionen unterschiedliche Formen der Zehenendorgane – Krallen, Klauen, Hufe und Nägel – entwickelt (HAMRICK, 2001). Das spezifische Zehenendorgan der Fleischfresser ist die Krallen. Bedingt durch die Anpassung der jeweiligen Spezies an ihre Umwelt, ist es zu funktionsbedingten Umwandlungsprozessen innerhalb der drei Schichten der Haut im Bereich der Zehenendorgane gekommen (HABERMEHL, 1996), weshalb im Folgenden zunächst die Struktur der unmodifizierten, behaarten Haut erläutert wird, um dann auf die Besonderheiten des Zehenendorganes im Allgemeinen bzw. der Krallen im Besonderen einzugehen.

### **2.2 DIE ALLGEMEINE KÖRPERDECKE, DAS INTEGUMENTUM COMMUNE**

Die allgemeine Körperdecke, das INTEGUMENTUM COMMUNE, stellt die äußere Bedeckung des Körpers dar. Sie ist in der Regel behaart und mit ekkrinen und/oder apokrinen Schweiß-, sowie holokrinen Talgdrüsen durchsetzt (MULLER et al., 1993 a). In Anpassung an die lokalen Belastungen haben sich aus der Haut Hautmodifikationen (Ballen, Zehenendorgan, Hautdrüsen, Horn) entwickelt (REESE, 1999). Modifikationen der Haut gehen von demselben Grundaufbau der unmodifizierten Haut aus. Dabei haben sich jedoch die einzelnen Schichten der Haut (Textabb. 1) strukturell an die jeweilige Funktion angepasst. Aus mikroskopisch-anatomischer Sicht setzt sich die allgemeine Körperdecke aus der OBERHAUT (Epidermis), der LEDERHAUT (Dermis sive Corium) und der UNTERHAUT (Subkutis sive Tela subcutanea sive Hypodermis) zusammen. Die beiden erstgenannten Hautschichten, Oberhaut und Lederhaut, werden zusammen auch als die eigentliche Haut, Cutis, bezeichnet (HABERMEHL, 1996). Die Haut stellt die Barriere zwischen der Umwelt und dem Tierkörper dar (STARCK, 1978; HOMBERGER, 2002). Sie ist das größte Organ des Körpers und erfüllt vielfältige Aufgaben

und Funktionen. So dient sie einerseits als Schutz des Körpers gegen physikalische, chemische und mechanische Einflüsse von außen, andererseits spielt sie eine große Rolle in der Aufrechterhaltung der Körpertemperatur und der Wärmeregulation sowie als Sinnesorgan für Temperatur, Schmerz, Druck und Spannung (HABERMEHL, 1996).

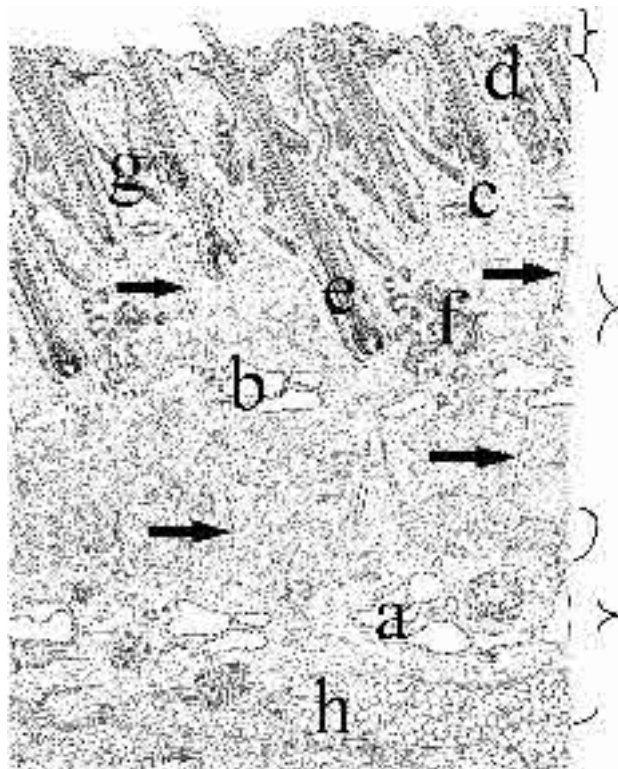
Diese Aufgaben kann die Haut nur dadurch erfüllen, dass sie sich z. B. durch unterschiedlich starke Verhornung, Pigmentbildung, Ausbildung spezifischer Hautanhangsorgane wie Federn oder Haare oder durch Ausbildung spezieller Hautsinnesorgane an die jeweilige Funktion anpasst (BUDRAS, 1999).

Die gefäßlose EPIDERMIS stellt dabei die äußerste Schicht dar. Durch die spezielle Fähigkeit der oberen Zellschichten zu verhornen, erfüllt die Epidermis dabei besonders die Funktion, äußeren mechanischen Einflüssen standzuhalten (HABERMEHL, 1996). Je nach Keratinisierungstyp enthält die durch Keratinisierung und Verhornung resultierende Hornzellschicht entweder hartes oder weiches Horn (s. a.: 2.2.2 Die Keratinisierung und Verhornung).

Eine Basalmembran verbindet Epidermis und Dermis miteinander und dient zudem der dermo-epidermalen Kommunikation. Sie setzt sich aus einer Basallamina und einer Lamina fibroreticularis zusammen (s. a.: 2.2.3 Die Basalmembran).

Die DERMIS beinhaltet viele Nerven und Gefäße. Neben der neuro-hormonalen Koordination übernimmt sie auch mechanische Aufgaben (HIRSCHBERG et al., 2001). Dabei dient die Ausbildung eines dreidimensionalen Papillarkörpers (s. a.: 2.2.5 Lederhaut) der festen Verzahnung der Lederhaut mit der Oberhaut. Die Anordnung des spezifischen Fasergeflechtes in der Dermis unterstützt die Stabilisation der Haut und dient der Kraftübertragung zwischen Epidermis und den tiefer liegenden knöchernen Strukturen (HABERMEHL, 1996).

Die SUBKUTIS dient als verschiebbliche Verbindungsschicht zwischen der eigentlichen Haut (Cutis) und ihrer jeweiligen Unterlage (z. B.: Knochen, Muskulatur). In das lockere Bindegewebe der Unterhaut sind, neben der Einlagerung von Fettzellen, reichlich Blutgefäße und gröbere Nervenetze eingebettet, welche zur Versorgung der eigentlichen Haut beitragen (HABERMEHL, 1996). Die Unterhaut kann sowohl tierartlich als auch in den verschiedenen Körperregionen in ihrem Aufbau stark variieren (HOMBERGER u. de SILVA, 2000) oder kann an einigen Körperstellen sogar ganz fehlen (TRAUTMANN, 1949; FREWEIN u. WALLER- BERGER, 1994). So dient sie am Ballen durch die Einlagerung von Fettgewebe als Druck- und Stoßpolster, während sie z. B. an der Ohrmuschel oder den Lippen ganz fehlt, wodurch diese Gebiete unverschieblich auf ihrer Unterlage aufliegen (HABERMEHL, 1996; REESE, 1999).



A

**TEXTABBILDUNG 1:**

Schematische Darstellung der Haut, modifiziert nach LIEBICH (1990). Neben der Ausbildung der einzelnen Hautschichten Oberhaut (A), Lederhaut (B) und Unterhaut (C) gibt die Illustration einen Überblick über die Ausbildung des subkutanen Gefäßplexus (a), des tiefen dermalen Gefäßplexus (b), des oberflächlichen dermalen Gefäßplexus (c) sowie des subepidermalen Gefäßplexus (d). Die Pfeilspitzen zeigen auf die Gefäße, welche die einzelnen Plexus miteinander verbinden. e. Haarpapille; f. Schweißdrüsen; g. M. arrector pili; h. Fettgewebe

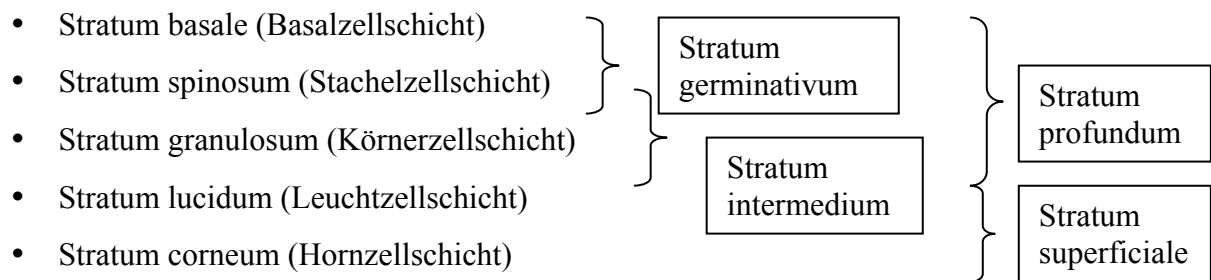
B

C

**2.2.1 DIE OBERHAUT (EPIDERMIS)**

Die Oberhaut ist ein mehrschichtiges verhornendes Plattenepithel. Generell erfüllt dieses mehrschichtige Plattenepithel vorwiegend die Aufgabe eines Schutzepithels. Für die Differenzierung dieses Epithels spielt das Ausmaß der mechanischen Belastung eine entscheidende Rolle. Die Epidermis des Hundes ist an behaarten Stellen normalerweise recht dünn (0,1 - 0,5 mm), kann jedoch an einigen unbehaarten Bereichen des Körpers, wie z. B. dem Zehenballen, ein dreifaches der Epidermisdicke der behaarten Haut annehmen (MULLER et al., 1993 a).

Ein mehrschichtiges Epithel besteht aus mindestens zwei übereinander liegenden Zelllagen. Das mehrschichtige verhornte Plattenepithel der Haut lässt sich aufgrund der verschiedenen Differenzierungsprozesse der Epithelzelle von der Epithelbasis bis zur Epitheloberfläche grundsätzlich in fünf verschiedene Schichten untergliedern (Liebich, 1990):



Die Ausprägung der einzelnen Zellschichten ist sowohl tierartlich als auch regional sehr unterschiedlich. Es müssen nicht immer alle genannten Oberhautschichten vorkommen. So tritt die Ausbildung eines Stratum granulosum (s. a.: 2.2.2 Die Keratinisierung und Verhornung) und eines Stratum lucidum nur an bestimmten Haut- und Hautmodifikationsbereichen auf.

Der größte Anteil der Zellen des mehrschichtigen Plattenepithels wird von Keratinozyten gebildet (85 %). Weitere Zellen in der Oberhaut, sogenannte Nicht-Keratinozyten, sind Melanozyten (Pigmentzellen) oder Abwehrezellen (Lymphozyten) (LIEBICH, 1990; LEONHARDT, 1990).

Der Keratinozyt, die gewebespezifische Zelle der Epidermis, erhielt seinen Namen aufgrund der Fähigkeit zu keratinisieren. Damit wird ein mehrstufiger Differenzierungsprozess (Prozess der Regeneration, Differenzierung, Reifung und Verhornung) beschrieben, bei dem die Epithelzellen von der Basalzellschicht bis zu den oberflächlichen Zellschichten durch die Bildung bestimmter Zytoskelettproteine (Keratine) keratinisieren und – belastungs- und regionsspezifisch – anschließend verhornen (ORFANOS, 1969). Eine Keratinisierung tritt auch in Zellen nicht verhornender Epithelien auf (KÜNZEL, 1990; BRAGULLA, 1996) (s. a.: 2.2.2 Die Keratinisierung und Verhornung).

Ein epidermaler Zellzyklus, von der Basal- bis zur Hornzelle, dauert innerhalb der äußeren behaarten Haut eines gesunden Hundes etwa 22 Tage. Wird die Haut geschoren, verkürzt sich diese Zeit auf zirka 15 Tage. Operationswunden oder Hauterkrankungen können die Mitoserate in der Basalzellschicht der Oberhaut anregen und damit die Erneuerungszeit der Epidermis weiter stark verkürzen (WINSTANLEY, 1975).

Die Epidermis selbst ist gefäßlos. Die Ernährung der noch lebenden Zellen in den unteren Epidermiszelllagen, auch als Stratum profundum zusammengefasst (Stratum basale, Stratum spinosum, Stratum granulosum), erfolgt über Osmose und Diffusion aus den Gefäßen der

Lederhaut. Teilweise werden die Lagen des Stratum profundum von freien Nervenendigungen durchzogen (HABERMEHL, 1996).

#### STRATUM BASALE (BASALZELLSCHICHT)

Die Keratinozyten des Stratum basale nennt man auch Basalzellen, weil sie über Hemidesmosomen in ihrer basalen Seite mit der Basallamina der Basalmembran fest in Verbindung stehen, wodurch eine stabile Verankerung mit dem darunter liegenden dermalen Bindegewebe erfolgt. Neben dieser basalen Verankerung ist die latero-laterale Verknüpfung zweier benachbarter Basalzellen eine wesentliche Voraussetzung für die Aufrechterhaltung der spezifischen Funktionen der Basalzellen (BAZZONI u. DEJANA, 2002) (s. a.: 2.2.4 Allgemeiner Bau und Verbindungen der Epithelzellen).

Basalzellen sind vor allem durch die Fähigkeit charakterisiert, sich zu teilen. Durch ihre Mitosefähigkeit stellen sie die eigentlichen Stammzellen der Epidermis dar (MATOLTSY u. PARAKKAL, 1967). Etwa die Hälfte der Keratinozyten dieser Schicht sind ständig mitotisch aktiv (Prozess der Regeneration), die übrigen Keratinozyten werden erst durch besondere Stimuli aktiviert (BRAUN et al., 2004).

Die Form der Basalzellen variiert von flach über kubisch, bis hin zu hochprismatischen Zellen (KÜNZEL, 1990). Basale Keratinozyten können sowohl in ihrer Gestalt als auch funktionell ein sehr heterogenes Bild aufweisen (LAVKER u. MALTOLSKY, 1971). Charakteristisch für die basalen Keratinozyten sind sogenannte Präkeratinfilamente (Intermediärfilamente, Tonofibrillen) (s. a.: 2.2.2 Die Keratinisierung und Verhornung). Diese filamentären Strukturproteine bauen ein lockeres Zytoskelett in der Basalzelle auf.

Wie bereits erwähnt, kommen neben den Keratinozyten noch weitere Zellen in der Epidermis vor, die unter dem Begriff „Nicht-Keratinozyten“ zusammengefasst werden und überwiegend im Stratum basale der Oberhaut liegen. Zirka fünf Prozent der basalen Zellen stellen Melanozyten dar. Es handelt sich hierbei um Zellen, die der Neuralleiste entstammen und mit den Keratinozyten eine „epidermale Melanineinheit“ bilden (GOLDSMITH, 1983). Keratinozyten und Melanozyten stellen eine funktionelle Einheit dar, wobei beide Zellarten eine Symbiose bilden und sich gegenseitig über Mediatoren (Cytokine) beeinflussen. Durch die Produktion spezifischer Melaningranula ermöglichen die Melanozyten eine Schutzfunktion gegenüber UV-Strahlung. Lichtmikroskopisch stellen sie sich als große, runde Zellen dar, die sich mit langen Ausläufern zwischen die Basal- und Stachelzellen schieben (SAJONSKI u. SMOLLICH, 1990). Eine weitere Zellart, welche ebenfalls innerhalb des Stratum basale vorkommt und deren Ursprung auch auf die embryonale Neuralleiste

zurückgeführt werden kann, stellen die Merkel-Zellen dar. Es handelt sich hierbei um langsam adaptierende Berührungsrezeptorzellen. Sie liegen entweder in der Basalschicht oder direkt unter der Basalmembran noch innerhalb der Dermis (SCHWARZ et al., 1981).

#### STRATUM SPINOSUM (STACHELZELLSCHICHT)

Aus den Basalzellen differenzieren sich die Spinosazellen (Stachelzellen) (SCHWARZ et al., 1981). Diese Stachelzellen haben eine überwiegend polygonale Form und liegen in unterschiedlicher Zellschichtdicke über den Basalzellen. Über Zellfortsätze (Spinae) stehen die einzelnen Zellen untereinander in Verbindung. Dabei bilden Desmosomen (s. a.: Kapitel 2.2.4: Allgemeiner Bau und Verbindungen der Epithelzellen) in dieser Schicht den funktionell wichtigsten direkten Kontakt zwischen zwei benachbarten Zellen. In Verbindung mit einem oftmals erweiterten Interzellularraum ermöglichen die Zellfortsätze lichtmikroskopisch eine leichte Identifikation der Stachelzellschicht (BUCHER u. WARTENBERG 1997 a; LIEBICH, 1990). Intrazellulär liegen zahlreiche, scherengitterförmig angeordnete Keratinfilamente. Diese, auch als „Tonofilamente“<sup>1</sup> bezeichneten Filamente tragen wesentlich zur Statik der Zelle innerhalb des Zellverbandes bei. Die Tonofibrillen<sup>2</sup> ziehen bis in die Zellfortsätze der Stachelzellen hinein. Neben den Tonofibrillen, die aus Keratinproteinen bestehen, sind die sogenannten membrane-coating granules (MCGs) (s.a: 2.2.4 Allgemeiner Bau und Verbindungen der Epithelzellen) ein Charakteristikum für die keratinisierende Epithelzelle. Hierbei handelt es sich um kleine Zellorganellen, die in Richtung Epitheloberfläche immer mehr zunehmen. Ihr Inhalt, das membrane coating material (MCM), wird in den Interzellularspalt abgegeben und dient dann als Kittsubstanz zwischen den Keratinozyten (MÜLLING, 1993).

Weitere im Stratum spinosum auftretende Zellen sind die Langerhans-Zellen. Sie stammen aus dem Knochenmark als Abkömmlinge der Monozyten bzw. Histiocyten und gehören zu dem „SALT“ (skin-associated lymphoid tissue). Sie dienen der Abwehr in der Oberhaut (KATZ, 1984). Die Langerhanszellen des Hundes sind aureophil, das heißt, mit Goldchlorid anfärbbar, und enthalten im Gegensatz zu denen anderer Tierarten keine Granula (MULLER, et al., 1993 a).

---

<sup>1</sup> lateinisch: tonus (griechisch: tonōs) = Spannung; filum (lateinisch)= Faden (lateinosch)

<sup>2</sup> fibrilla = Fäserchen

### STRATUM GRANULOSUM (KÖRNERZELLSCHICHT)

Die Zellen des Stratum spinosum differenzieren sich weiter zu Zellen des Stratum granulosum (Stadium der Reifung). Sie haben eine vorwiegend oberflächenparallel abgeplattete Form. Je nach Verhornungsgrad ist die Körnerzellschicht drei bis fünf Zellschichten dick. Neben einer hohen Dichte an Tonofilamenten sind für die Körnerzellen 0,2 bis 2 µm große, rundliche, meist basophile, nicht membranumhüllte Proteine, die sogenannten Keratohyalingranula, charakteristisch (KÜNZEL, 1990; LIEBICH, 1990) (s. a.: 2.2.2 Die Keratinisierung und Verhornung). In den oberflächlichen Zellschichten der Körnerzellschicht kommt es zur beginnenden Degeneration von Zellkern und Zellorganellen (LIEBICH, 1990).

### STRATUM LUCIDUM (LEUCHTZELLSCHICHT)

Aus dem Stratum granulosum kann sich ein Stratum lucidum entwickeln. Diese Leuchtzellschicht besteht aus toten, stark abgeplatteten, noch unvollständig verhornten Zellen. Das Stratum lucidum ist lichtmikroskopisch strukturlos und stark lichtbrechend (durch das Protein Eleidin) und zeichnet sich durch eine hohe Acidophilie aus (SCHWARZ et al., 1981). Teilweise ist es sehr schwer vom darauf folgenden Stratum corneum abzugrenzen.

### STRATUM CORNEUM (HORNZELLSCHICHT)

Das ganz oberflächlich liegende Stratum corneum besteht aus vollständig verhornten, abgeplatteten Zellen. Charakteristisch für diese Schicht ist die Auflösung der Zellkerne und Zellorganellen, sowie eine Verdickung der Zellmembran. Es kommt zur Bildung von Keratin (Skleroprotein) aus Keratohyalin und Tonofilamentbündeln (s. a.: 2.2.2 Die Keratinisierung und Verhornung) (LIEBICH, 1990). Zellgrenzen sind oft nicht mehr zu erkennen. Die Dicke der Hornzellschicht hängt sehr stark von der Lokalisation ab. Das Stratum corneum lässt sich funktionell in ein Stratum conjunctum (kompakte Schicht, es besteht noch ein Zellverband) und in ein Stratum disconjunctum (abschilfernde Hornschicht) einteilen (SAJONSKI u. SMOLLICH, 1990). Die Hornzellen werden kontinuierlich durch die von unten immer nachschiebenden Zellgenerationen erneuert. Ein physiologischer mechanischer Abrieb hält die Hornzellschichtdicke konstant (s. a.: 2.2.2 Die Keratinisierung und Verhornung).

## 2.2.2 DIE KERATINISIERUNG UND VERHORNUNG

### DIE KERATINISIERUNG

Die Keratinisierung tritt sowohl in Epithelzellen von verhornenden als auch in Zellen von nicht verhornenden Epithelien auf (KÜNZEL, 1990, BRAGULLA, 1996). Sie ist charakteristisch für die Epidermiszelle und bildet eine Grundvoraussetzung für die sich in der Oberhautzelle anschließenden Verhornung. Die Differenzierungsprozesse der Keratinisierung der Epidermiszelle umfasst mehrere Teilprozesse und geht immer mit der Bildung von Zytokeratinen (s.u.), keratinfilamentassoziierten Proteinen (Filaggrinen) (s.u.) und membrane coated granules (MCGs) (s.u.) einher (BRODY, 1960; HASHIMOTO, 1969; LIEBICH, 1990). Die aus der Keratinsynthese resultierenden Keratine weisen dabei funktionell bedingt eine besondere Zusammensetzung auf. Keratine und Filaggrine lagern sich zu einem Filament-Matrix-Komplex zusammen. Filaggrine werden in epidermalen Bereichen, die dem sogenannten weichen Verhornungsmodus unterliegen, zuerst in polymerer Form als Profilaggrine in basophilen Keratohyalin granula zwischengespeichert (LIEBICH, 1990). Die im Zuge der Keratinisierung aufgebauten MCGs geben ihren Inhalt, das membrane coating material (MCM), durch Exozytose in den Interzellularraum ab (BRAGULLA, 1996). Zeitgleich mit der Entstehung der MCGs, aber nicht notwendigerweise abhängig von deren Bildung, legt sich von innen an das Plasmalemm der Oberhautzelle ein disulfidreiches, elektronendichtes Material an (HASHIMOTO, 1971 a). Es wird in der Literatur als marginales Band oder cellular envelope bezeichnet (HASHIMOTO, 1971 a) und erhöht die Widerstandsfähigkeit der Hornzelle gegenüber keratolytischen Reagenzien (MATOLTSY u. PARAKKAL, 1967). Fehlen entscheidende Schritte, nämlich das Umfließen der Zytokeratine durch intermediärfilamentassoziierte Proteine und deren Interaktion durch Disulfidbrücken, so können die Zellen sehr wohl tot sein, sie stellen damit aber keine Hornzellen im eigentlichen Sinne dar, wie z. B. für die hinfällige Krallenkapsel der Katzenkrallen (ERNSBERGER, 1998). Der Zelltod tritt hier bereits im Differenzierungsstadium des Stratum granulosum ein.

### KERATINE (ZYTOKERATINE)

Keratine sind fibrilläre Strukturproteine, die von Epithelzellen synthetisiert werden (WALTER, 2001; BRAGULLA, 1996). Sie stellen Konstruktionselemente des Zytoskelettes dar (Strukturproteine, Skleroproteine), wodurch sie wesentlich zur Stabilisation der Zelle und damit des gesamten Zellverbandes beitragen. Sie stützen den gesamten Zellverband, indem sie an den Haftplatten von Zellkontakten inserieren (s. a.: Kapitel 2.2.4: Allgemeiner Bau und



Verbindungen der Epithelzellen) und somit eine funktionelle Stabilität auf die Nachbarzellen übertragen. Weiterhin verankern Keratine den Zellkern und dienen auch als Leitschiene für spezielle Transportvorgänge innerhalb der Zelle (FRANKE u. WARTENBERG, 1993).

Neben den statischen und mechanischen Aufgaben, die sie in der voll ausgereiften Zelle übernehmen, spielen Keratine auch eine wesentliche Rolle in der frühen embryonalen und foetalen Entwicklungsphase. Dabei werden in den verschiedenen Entwicklungsphasen unterschiedliche Keratine exprimiert (FUKUYAMA et al., 1980; BRAGULLA, 1996 u. 1998). Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass Keratine weiterhin eine wesentliche Rolle in der Pathogenese sowie bei bestimmten Heilungsprozessen innerhalb der Haut und Hautmodifikationen im Anschluss an krankhafte Prozesse in Form des Keratinozyten-Aktivierungs-Zyklus spielen (ISHIDA-YAMAOTO et al., 2000; FREEDBERG et al., 2001).

#### KERATOHYALINGRANULA

Das Vorkommen von Keratohyalingranula ist ein charakteristisches Merkmal für Zellen des Stratum granulosum der Epidermis (KRÖLLING, 1960; FUKUYAMA et al., 1980). Die Ausbildung resp. Dicke eines Stratum granulosum und ihr Gehalt an Keratohyalingranula hängt wesentlich von der funktionellen Beanspruchung des Oberhautabschnittes ab. So weist die modifizierte haarlose Epidermis der Haut des Zehenballens ein weitaus dickeres Stratum granulosum auf als die unmodifizierte Epidermis der äußeren behaarten Haut (KRÖLLING, 1960).

Keratohyalingranula werden von Ribosomen synthetisiert und kommen in der Epidermis des unmodifizierten Integumentum commune im Zuge der Differenzierung der keratinisierenden Zellen vor (BANKS, 1986: „soft keratin“). Lichtmikroskopisch stellen sich diese Strukturen als basophile Granula dar (KÜNZEL, 1990). Diese lassen sich gut mit Hämatoxylin anfärben (FUKUYAMA et al., 1980). Chemisch bestehen Keratohyalingranula aus einem sehr heterogenen Gemisch an Proteinen (FUKUYAMA u. EPSTEIN, 1975). Keratohyalingranula sind zwischen 10 nm und mehreren Mikrometern groß und stehen in direktem Kontakt mit den Ribosomen oder den Keratinfilamenten (BRODY, 1960; MATOLTSY u. PARAKKAL, 1967). Zusammen mit den Keratinfilamentbündeln bilden die stark disulfidhaltigen Keratohyalingranula im Zuge der Keratinisierung und Verhornung der Epithelzelle einen Filament-Matrix-Komplex (LIEBICH, 1990). Dieser trägt in Verbindung mit den Keratinfilamentbündeln wesentlich zur Stabilisierung der Zelle bei (MATOLTSY, 1975). Keratohyalingranula sind auch in der „modifizierten Epidermis“ verschiedener Hautanhangsorgane zu finden (BRAGULLA, 1996). Die Anzahl der Keratohyalingranula

enthaltenden Zellen innerhalb eines definierten Bereiches der Epidermis ist variabel und kann z. B. während der postnatalen Entwicklung der Epidermis des Ballens der Katze bis zu einem Alter von drei Monaten zunehmen. Keratohyalin granula spielen als „unreife Keratohyalin granula“ auch schon während der Embryonalentwicklung der Haut- und Hautmodifikationen eine wichtige Rolle (HAYWARD u. KENT, 1981) (s. a.: Kapitel: Die embryonale Entwicklung der behaarten Haut und die embryonale Entwicklung des Zehenendorganes)

#### KERATINFILAMENTASSOZIIERTE PROTEINE (FILAGGRINE)

Keratinfilamentassoziierte Proteine werden im Verlauf der Keratinisierung der Epithelzellen gebildet. In Epithelzellen des „weichen“ Verhornungstyps liegen die Vorstufen dieser keratinfilamentassoziierten Proteine, die sogenannten Profilaggrine, in Granula gespeichert vor. Diese Keratohyalin granula sind für das Stratum granulosum der Oberhaut kennzeichnend. Die keratinfilamentassoziierten Proteine der Keratinozyten, die dem „harten“ Verhornungsmodus unterliegen, kommen frei in der Zelle vor, wodurch bei diesen Epithelzellen das Auftreten eines Stratum granulosum entfällt (STEINERT et al., 1984; LIEBICH, 1990). Keratinozyten, die nach dem „harten“ Modus verhornen, synthetisieren ein sehr schwefelhaltiges keratinfilamentassoziiertes Protein. Dieses enthält zahlreiche Cystein-Aminosäuren und ist über Disulfidbrücken mit den nicht helikal gewundenen Abschnitten der Keratinfilamente verbunden (STEINERT et al., 1984).

#### MEMBRANE COATING GRANULES (MCG) UND MEMBRANE COATING MATERIAL (MCM)

Membrane coating granules (MCGs) gehören zu der Gruppe der „lamellar granules“ und entsprechen den „avian multigranular bodies“ bzw. den „reptilian mesos granules“ (LANDMANN, 1980). Es sind submikroskopisch kleine Zellorganellen, die in den keratinisierenden Zellen von verhornenden und unverhornten Plattenepithelien gebildet werden (BUDRAS et al., 1991; BRAGULLA, 1996). Sie treten zuerst in geringem Umfang in den untersten Lagen der Stachelzellschicht auf, ihre Anzahl nimmt mit fortschreitender Differenzierung der Epithelzelle zu. Die feinkörnigen oder lamellären, 100 nm bis 300 nm großen Granula werden im Golgiapparat gebildet und dann in die Zellperipherie transportiert (MÜLLING, 1993). Der Inhalt der MCGs wird als membrane coating material (MCM) bezeichnet und setzt sich aus Glykoproteinen, Lipiden und verschiedenen Enzymen zusammen. Das MCM wird durch Exozytose in den Interzellularspalt abgegeben

(MATOLTSY u. PARAKKAL, 1967; HASHIMOTO, 1971 b; MÜLLING, 1993). Diese auch als Interzellularkitt bezeichnete Masse dient einerseits dem Zusammenhalt der Keratinozyten und der Aufrechterhaltung der semipermeablen Membran, andererseits trägt sie auch zur Auflösung der Desmosomen (s. a.: 2.2.4 Allgemeiner Bau und Verbindungen der Epithelzellen) im Interzellularspalt und dadurch zur Desquamation und Zerstörung der Hornzelle bei (MATOLTSY, 1966; MÜLLING, 1993).

### DIE VERHORNUNG

Das Endprodukt eines mehrschichtigen verhornten Plattenepithels stellt der Verband aus „toten Hornzellen“, das Stratum corneum, dar. Der Begriff „Verhornung“ bezeichnet einen besonderen Differenzierungsprozess der Epithelzellen, der nicht mit dem Begriff der „Keratinisierung“ gleichzusetzen ist. Eine Keratinisierung tritt auch in nicht verhornenden Epithelzellen auf (KÜNZEL, 1990). Der Begriff der Verhornung wird verwendet, um ein mehrschichtig verhornendes Plattenepithel von einem nicht verhornendem Plattenepithel zu unterscheiden, wenngleich es auch hier belastungsabhängig fließende Übergänge – z. B. im Epithel der Mundhöhlenschleimhaut – gibt (LEONHARDT, 1990). Charakteristisch für ein mehrschichtiges, verhornendes Epithel ist „der geplante Zelltod“ der lebenden Zelle (Nekrobiose) im Abschluss ihrer gewebespezifischen Differenzierung (KÜNZEL, 1990). Dieser Vorgang wird oft auch als Apoptose bezeichnet (REICHERT et al., 1993). Im histologischen Präparat ist die Apoptose anhand der Veränderung der Struktur des Zellkernes oder an der Auflösung des Zellkernes und der Zellorganellen zu erkennen (LIEBICH, 1990). Je nach funktioneller Beanspruchung der Oberhaut treten unterschiedliche Verhornungstypen auf. Unter diesem Begriff „Verhornungstyp“ werden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Differenzierungsprozesse von Epithelzellen eines mehrschichtigen verhornten Plattenepithels zusammengefasst (BRAGULLA, 1996). Man unterscheidet hierbei zwischen einem „weichen“ und einem „harten“ Verhornungstyp (KÜNZEL, 1990). Unter dem Begriff der „weichen“ Verhornung werden die Epithelien zusammengefasst, denen das Auftreten eines Stratum granulosum zuteil wird. Fehlen die charakteristischen basophilen, histidinreichen Keratohyalin granula, die ein Stratum granulosum ausmachen (KÜNZEL, 1990), so spricht man bei diesen Epithelien von einer „harten“ Verhornung (PREUSS, 1957; KORTE, 1987, SEIDEL, 1992; MÜLLING, 1993). Epithelzellen des harten Verhornungstyps synthetisieren keratinfilamentassoziierte Proteine mit einem hohen Schwefelgehalt. Das Fehlen der Keratohyalin granula, der hohe Gehalt an Disulfidbrücken und der damit verbundene hohe Schwefelgehalt ermöglichen eine gute Unterscheidung zwischen Epithelien,

die dem harten Verhornungstyp unterliegen, von denen, die nach dem weichen Modus verhornen (BARNETT u. SELIGMAN, 1952; BANKS, 1986; KNOSPE, 1989; BRAGULLA, 1996).

In Abhängigkeit vom Verhornungstyp bildet sich ein unterschiedlich hartes Horn aus. Je nach Funktion an der betreffenden Körperstelle ist das Horn weicher (Ballen, hat teilweise taktile Funktionen; weicher Verhornungsmodus) oder fester (Kronhorn, beim Zehenspitzenwandler reine Tragefunktion der Körperlast; harter Verhornungsmodus). Dabei schilfern die Zellen des weichen Hornes leichter ab als diejenigen des harten Hornes (BRAGULLA, 1996).

### **2.2.3 DIE BASALMEMBRAN**

Die Basalmembran stellt die physikalisch-chemische Grenz- und Verbindungsschicht zwischen Epidermis und Dermis dar und ist zudem eine wichtige Kommunikationsschnittstelle zwischen diesen beiden Hautschichten (dermo-epidermale Koordination) (GOLDSMITH, 1983). Lichtmikroskopisch lässt sie sich mit der PAS-Färbung oder durch eine Imprägnation mit Silbersalzen darstellen.

Ultrastrukturell setzt sich die Basalmembran aus der Lamina basalis und der Lamina fibroreticularis zusammen. Die Lamina basalis besteht wiederum aus einer Lamina rara seu lucida und einer Lamina densa (BUCHER u. WARTENBERG, 1997 a) und wird von den Epithelzellen gebildet (SENGEL, 1986). Die Lamina densa wird von einigen Autoren (BRIGGAMANN, 1982, LIEBICH, 1990) auch mit der Basallamina gleichgesetzt. Die Lamina rara der Basallamina ist ein elektronenmikroskopisch fast leerer Raum zwischen den Epithelzellen und der Lamina densa. Laut MERCER (1958) entsteht diese Schicht erst bei der Entwässerung der Proben für die ultrastrukturelle Untersuchung und stellt damit nur ein Artefakt dar.

Chemisch betrachtet setzt sich die Basallamina aus einem Protein-Polysaccharidkomplex (Kollagen Typ IV, Laminin, Fibronectin) zusammen. Mechanisch steht sie in direkter Verbindung mit den Haftkomplexen (Hemidesmosomen) der Epithelzellen.

Die Lamina fibroreticularis ist die dritte Schicht der Basalmembran. Sie wird von den Fibrozyten der Lederhaut gebildet und stellt sich als dichte Faserschicht aus Kollagen Typ III, Retikulinfasern und amorphen Glykogenproteinen dar und verbindet die Basallamina mit der Interzellulärsubstanz der Dermis (BRIGGAMANN, 1982; LIEBICH, 1990).

## 2.2.4 ALLGEMEINER BAU UND VERBINDUNGEN DER EPITHELZELLEN

### FORM DER EPITHELZELLE

Die Form einer einzelnen Epithelzelle kann je nach Stellung in ihrem Zellverband und nach ihrer Funktion außerordentlich variabel sein. Dementsprechend unterscheidet man zwischen abgeplatteten, isoprismatischen und hochprismatischen Zellen.

### ZELL-ZU-ZELL-VERBINDUNGEN

Die Verbindungen einzelner benachbarter Zellen stellen ein wichtiges Kommunikations- und Verankerungsmittel der Zellen untereinander dar. Zell-zu-Zell-Verbindungen sind für die Funktion eines gesamten Zellverbandes von außerordentlicher Bedeutung, da diese die Informationsweitergabe zwischen den Zellen z. B. zur koordinierten Zelldifferenzierung ermöglichen. Je nach Zellstruktur und Funktion haben sich hierfür unterschiedliche Verbindungen entwickelt. Zwischen den einzelnen Zellen liegt immer ein Interzellularspalt. Dieser ist in der Regel lichtmikroskopisch nicht sichtbar und wird nur in bestimmten Fällen – wie im Stratum spinosum von mehrschichtigen Plattenepithelien – auch lichtmikroskopisch erkennbar.

Grundsätzlich wird bei der Verknüpfung der lateralen Seitenflächen zweier benachbarter Zellen zwischen einem direkten und einem indirekten Kontakt unterschieden.

Die indirekte Zellverbindung wird durch die unregelmäßig stark ausgeprägte, fingerförmige Verzahnung seitlicher Zellflächen repräsentiert. Die Weite des Interzellularraumes und die Glykokalix (= Mantel aus Zuckerresten, welcher dem Plasmalemm als äußere Schicht aufliegt) erfüllen dabei die Funktion, Informationen direkt oder indirekt (durch Botenstoffe) in die Zelle aufzunehmen und zu verarbeiten (LIEBICH, 1990). Die Synthese von bestimmten Glykoproteinen durch einzelne Epithelzellen kann wiederum zur Identifikation dieser Zellen genutzt werden (s. a.: Kapitel: Material und Methoden, Abschnitt: Lektine) (PARSLEW et al., 1998)

Direkte Zellverbindungen sind Desmosomen<sup>3</sup> (Maculae adhaerentes), tight junctions (Zonula occludentes), Haftkomplexe (junctional complexes) und Nexus (gap junctions, Maculae communicantes).

---

<sup>3</sup> griechisch: desmos = Band, soma = Körper

DESMOSOMEN (Maculae adhaerentes) sind diskontinuierlich vorkommende, plaqueförmige Haftplatten an den Zellmembranen. Sie stehen in einer funktionellen Einheit mit einer Zonula adherens, welche als feinfaserige Zytoplasmaverdichtung einen gürtelförmigen Bereich um die Zelle bildet (MATOLTSY, 1975; BUCHER u. WARTENBERG, 1997 b). An Bereichen der Zellmembran zweier gegenüberliegender Zellen, an denen sich Desmosomen ausbilden, kommt es im Kontaktbereich zu einer Verdichtung der oberflächlichen Lipidschichten der Zellmembranen durch die Einlagerung von speziellen Membranproteinen. Zusätzlich werden in diesem Bereich die subzytoplasmalen Verankerungen der intrazytoplasmatischen Filamentbündel (Tonofibrillen) zu Haftplatten verstärkt. Diese sorgen für eine mechanische Stabilität der Zellverbindungen (MATOLTSY, 1975; BUCHER u. WARTENBERG, 1997 b, LIEBICH, 1990).

TIGHT JUNCTIONS (Zonulae occludentes) sind Zellmembranzonen mit einem besonders hohen Gehalt des Proteins Occludin. Diese Zonen sind durch die partielle Verschmelzung zweier benachbarte Zellmembranen miteinander charakterisiert. Es kommt zu einem gürtelförmigen, vollständigen Verschluss des Interzellularspaltes in diesem Zellabschnitt. Neben dem gehäuftem Auftreten in den oberen Epithelzellschichten des Stratum granulosum kommen tight junctions zudem noch während der Embryonalentwicklung der Haut zwischen den sich zuerst entwickelnden Epithelzellen vor (MORITA et al., 1998).

HAFTKOMPLEXE (junctional complexes) entstehen durch die Kombination der Zonula occludens mit der Zonula adherens und den Maculae adhaerentes (Desmosomen). In prismatischen Epithelien kommt diese Kombination direkter Zellverbindungen am apikalen Ende der Interzellularspalten als sogenannte Schlussleiste vor.

NEXUS (gap junctions) entstehen durch eine Einengung des Interzellularraumes auf einen kleinen Spalt (gap). In Verbindung mit der Ausbildung spezieller Tunnelproteine (Connexine) in der Zellmembran wird der Austausch von Ionen und kleinstmolekularen Stoffen von einer Zelle in die andere möglich (LIEBICH, 1990).

### ZELLKERN

Die EPITHELZELLE besitzt in der Regel nur einen Zellkern, wobei sich die Form des Zellkernes an die Form der Zelle anpasst (BUCHER u. WARTENBERG, 1997 b). Die Kerngröße steht in Beziehung zur Größe des Zelleibes (Kern-Plasma-Relation). Je nach Stoffwechselaktivität der Zelle erscheinen die chromosomalen DNS-Anteile des Zellkernes (Chromatin) als lockeres, feinfibrilläres Euchromatin oder als eng verbundenes

Heterochromatin. Das Heterochromatin findet sich vor allem in Zellen mit einer geringen Stoffwechselaktivität. Histologisch erscheinen diese Kernbereiche unregelmäßig granuliert und färben sich intensiv basophil an. Euchromatinreiche Zellkerne färben sich histologisch nur schwach an. Funktionell stellt das Euchromatin die aktiven entspiralisierten DNS-Stränge eines Chromosoms dar (BUCHER u. WARTENBERG, 1997 b; LIEBICH, 1999).

Kernkörperchen (Nucleoli) sind rundliche, lichtmikroskopisch meist homogene Gebilde, welche eine entscheidende Funktion im Rahmen der Proteinsynthese haben. Sie werden während der mitotischen Teilung der Zelle aufgelöst und treten erst nach deren Abschluss wieder in Erscheinung.

Neben der Kerngröße kann auch die Kernform auf einen gewissen Funktionszustand der Zelle – aktiv oder passiv – hinweisen. Infolge ihrer Plastizität passt sich jedoch der Zellkern sehr gut den Formveränderungen der gesamten Zelle an. Meist liegt der Zellkern als kugelförmiges Gebilde im Zentrum der Zelle. In hochprismatischen oder stark abgeplatteten Zellen kann der Zellkern jedoch auch ellipsoidal (seine Längsachse läuft parallel mit der Zelllängsachse) oder stark abgeplattet in der Zelle auftreten.

Schließlich kann es innerhalb der unterschiedlichen Differenzierungsprozesse der Zelle auch zu einer Lageveränderung des Zellkernes innerhalb der Zelle kommen. Die Lage des Zellkernes ist sehr variabel und reicht von basal über zentral nach apikal. In einigen Zellen kann der Zellkern sogar ganz abgeflacht an der Zellwand liegen (BUCHER u. WARTENBERG, 1997 b; LIEBICH, 1990).

### **2.2.5 DIE LEDERHAUT (DERMIS, CORIUM)**

Die Lederhaut stellt die bindegewebige Unterlage der Epidermis dar. Je nach Lokalisation am Körper kann die Lederhaut unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Im Bereich der behaarten Haut stellt die Lederhaut den dicksten Teil der drei Hautschichten (SCHWARZ et al., 1981). Sie setzt sich aus Fibrozyten, aus von diesen produzierten geformter (kollagene und elastische Fasern) und ungeformter Grundsubstanz (polyanionische Proteoglykane und Strukturglykoproteine), sowie freien Zellen zusammen und beherbergt Nerven und Gefäße. In der behaarten Haut finden sich im Bereich der Lederhaut zusätzlich noch Haare, Haarbalgmuskeln, holokrine Talg- sowie apokrine und ekkrine Schweißdrüsen (MULLER et al., 1993 a). Die behaarte Haut des Hundes besitzt keine ekkrinen Schweißdrüsen. Diese sind nur im Bereich der Zehenballen zu finden. Am Zehenballen fehlen dafür apokrine Schweiß- sowie holokrine Talgdrüsen (MULLER et al., 1993 a). Talg- und Schweißdrüsen sowie Haare stellen

Anhangsgebilde der Oberhaut dar, welche während der embryonalen Entwicklung als Epithelzapfen die Lederhaut einstülpen und sich weiter differenzieren (LEONHARDT, 1990; LIEBICH, 1990).

Die Dermis lässt sich aufgrund der Dichte und Anordnung des kollagen-elastischen Fasergrundgerüsts in ein oberflächliches Stratum superficiale und ein tiefes Stratum profundum untergliedern (LIEBICH, 1990). Irreführenderweise wird das Stratum superficiale häufig auch als Stratum papillare und das Stratum profundum als Stratum reticulare bezeichnet. Die Begriffe, Stratum papillare und Stratum reticulare, resultieren aus einer Beschreibung der Lederhaut an Stellen, an der die Lederhaut Papillen an ihrer Grenzfläche zur Epidermis ausgebildet hat. Da dies jedoch nicht immer der Fall ist, sind die Definitionen Stratum superficiale und Stratum profundum für die grundsätzliche Beschreibung der Einteilung der Lederhaut besser geeignet. Zudem wird die Grenzfläche der Dermis zur Epidermis als Papillarkörper (s.u.) bezeichnet. Das Stratum superficiale sive papillare reicht aber meist viel tiefer (KÜNZEL, 1990).

Eine Abgrenzung beider dermalen Schichten wird bei der Haut des Hundes durch eine undeutlicher Ausprägung der einzelnen Abschnitte im Gegensatz zur Haut anderer Tierarten (Pferd, Rind) leider oft erschwert (KÜNZEL, 1990).

#### STRATUM SUPERFICIALE UND PAPILLARKÖRPER

Das STRATUM SUPERFICIALE bezeichnet den oberen Bereich der Lederhaut bis zur Angrenzung an die Epidermis. Diese dreidimensional gestaltete Grenzfläche zur Epidermis wird auch als Papillarkörper der Lederhaut bezeichnet. Der Papillarkörper dient der dermo-epidermalen Verzahnung; seine Form steht in enger Beziehung zur mechanischen Beanspruchung der Haut oder Hautmodifikation. Dementsprechend bildet sich je nach Lokalisation ein spezieller Papillarkörper aus. Die Entwicklung des Papillarkörpers steht wiederum in enger Beziehung zur Epidermis, welche einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung des Papillarkörpers nimmt (SENGEL, 1986; MÜLLING u. BUDRAS, 2002). Lichtmikroskopisch erscheint der Papillarkörper glatt, papillen- (= zöttchen-), leisten- oder blättchenförmig. SIMON (1951) bezeichnet die unterschiedlichen Formen an der Lederhaut als Wälle, Sockel, bzw. Krater, Gräben und Senken. Die Oberflächen von Dermis und Epidermis verhalten sich wie Patrizie (Dermis) und Matrize (Epidermis) zueinander (BOAS, 1881; ZIETZSCHMANN, 1918). Beide Gewebe beeinflussen sich gegenseitig und bestimmen so ihre Form und Grenzfläche.



Das Stratum superficiale der Dermis besteht aus einem lockeren Kollagenfasernetz, welches von elastischen Fasern durchzogen wird und im Gegensatz zum Stratum profundum recht zellreich ist (fixe Zellen, wie Fibrozyten und Fibroblasten, die sich dem Verlauf der Fasern anpassen und freie, mobile Bindegewebszellen, wie Mastzellen und Plasmazellen) (KÜNZEL, 1990; LIEBICH, 1990). Die Kollagenfasern im Stratum superficiale gehören hauptsächlich dem Kollagentyp III (retikuläre Fasern) an und sind feiner als die des Stratum profundum (KÜNZEL, 1990). Im Bereich der Lamina fibroreticularis (dermaler Teil der Basalmembran) (s. a.: 2.2.3 Basalmembran) findet man vorwiegend den Kollagentyp III. In den Verankerungsfibrillen der Lamina fibroreticularis der Basalmembran kommt auch noch der Kollagentyp VIII vor (GOLDSMITH, 1983; KATZ, 1984).

#### STRATUM PROFUNDUM

Das STRATUM PROFUNDUM der Lederhaut stellt eine faserreiche, straffe und zellarme Schicht dar (KÜNZEL, 1990; LIEBICH, 1990). Der vorherrschende Kollagenfasertyp der tiefen Lederhautschicht ist der Kollagentyp I, begleitet von elastischen Faserbündeln. Die Fasern sind vorwiegend oberflächenparallel ausgerichtet. Durch die besondere scherengitterartige Anordnung der Bindegewebsfasern erhält das Stratum profundum eine außerordentliche Festigkeit und Belastbarkeit.

#### DIE GEFÄßE IN DER LEDERHAUT

Die BLUTGEFÄßE DER LEDERHAUT dienen neben der Ernährung der Dermis und der gefäßlosen Epidermis auch der Blutdruck- und Temperaturregulation. Dabei stehen die Gefäße und Nerven in einem engen räumlichen und funktionellen Zusammenhang.

In der Lederhaut kann man grundsätzlich ZWEI GROßE GEFÄßPLEXUS unterscheiden, das Rete arteriosum et venosum subpapillare sive superficiale (oberflächlicher Gefäßplexus) und das Rete arteriosum et venosum dermidis sive profundum (tiefer Gefäßplexus). Von dem Rete arteriosum et venosum superficiale ziehen, je nach Ausprägung des Papillarkörpers, Äste in diesen hinein und bilden dort entweder kurze subepidermale Gefäßschlingen oder größere Kapillarschleifen aus (LOEFFLER, 1966; DOBLER, 1969; YEN u. BRAVERMANN, 1976). Die Ausbildung der subepidermalen Gefäßschlingen ist somit regional unterschiedlich und muss nicht grundsätzlich zu einer deutlichen Ausprägung kommen, wobei das subepidermale Gebiet in solchen Fällen direkt vom oberflächlichen dermalen Gefäßplexus vaskularisiert

wird (DOBLER, 1969; HABERMEHL, 1996). Die subepidermalen Kapillaren sind meist in ein enges Netz von elastischen Fasern verflochten (LIEBICH, 1990).

Der sich an der Grenze zwischen dem Stratum superficiale (oberflächliche Lederhautschicht) und dem Stratum profundum (tiefe Lederhautschicht) ausbildende Gefäß- und Nervenverband wird als vaso-neuro-hormonaler Verbund bezeichnet (KÜNZEL, 1990).

Das Rete arteriosum et venosum dermidis profundum (tiefer Gefäßplexus) liegt an der Grenze zur Unterhaut. Es ist beim Fleischfresser meist weniger deutlich ausgeprägt als der oberflächliche dermale Gefäßplexus. Dadurch erscheint die Gefäßdichte in der tiefen Dermislage geringer zu sein als im oberflächlichen Bereich (KÜNZEL, 1990). Gespeist wird der tiefe Lederhautplexus aus dem Gefäßplexus der Unterhaut (Rete arteriosum et venosum subcutaneum sive subfasciale). Von ihm treten größere Gefäße in die Lederhaut, um dort den tiefen Lederhautplexus zu bilden (LOEFFLER, 1966; YEN u. BRAVERMANN, 1976).

#### DIE FUNKTION DER LEDERHAUT

Die Lederhaut erfüllt zahlreiche Aufgaben. Sie hat unter anderem neben einer rein mechanischen Funktion (Verzahnung mit der Epidermis, Verformbarkeit der Haut) für die Ernährung und nervalen Versorgung der Epidermis zu sorgen, muss immunologische Aufgaben übernehmen (Einlagerung von Immunzellen), ist durch ihre sauren Mucopolysaccharide für einen konstanten Gewebeturgor verantwortlich und dient auch der sensorisch-sensiblen Versorgung der Haut (MULLER et al., 1993 a).

Dabei kommen dem oberflächlichen Stratum superficiale weitaus mehr Aufgaben zu, als dem tiefen Stratum profundum. Das Stratum superficiale dient mit seinem Papillarkörper der Verzahnung der Dermis mit der Epidermis. Je nach Gestaltung des Papillarkörpers kommt es hierbei zu einer enormen Vergrößerung der dermo-epidermalen Kontaktfläche. Diese Oberflächenvergrößerung des gefäß- und nervenreichen Stratum superficiale dient einer besseren Ernährung und charakteristischen nervösen Versorgung der Dermis und gefäßfreien Epidermis. Zudem befinden sich vorzugsweise in der oberflächlichen Lederhautschicht die Haare, Talg- und Schweißdrüsen als Abkömmlinge der Epidermis, sowie freie Zellen (Lymphozyten, Plasmazellen, Makrophagen und Mastzellen), welche für den Ablauf spezifischer und unspezifischer Immunreaktionen in der Haut zuständig sind (LIEBICH, 1990; MULLER et al., 1993 a).

Im Stratum profundum bilden sich in Abhängigkeit von der mechanischen Beanspruchung kollagene Faserbündel aus. Die rhomboiden Maschen, welche durch die scherengitterartige Anordnung der kollagenen und elastischen Fasern entstehen, ermöglichen der gesamten Haut eine gewisse Verschieblichkeit und geben ihr einerseits eine spezifische Struktur und Festigkeit, andererseits verhindern die zugfesten Kollagenfasern ein Überdehnen der Haut (HABERMEHL, 1996).

### **2.2.6 DIE UNTERHAUT (SUBCUTIS, TELA SUBCUTANEA, HYPODERMIS)**

Die Unterhaut dient als allgemeine Verbindungs- und Verschiebeschicht der Dermis mit den darunter liegenden Geweben (Faszien oder Muskulatur). In Abhängigkeit von ihrer Lokalisation und Funktion besteht eine große Variabilität in der Ausbildung der Unterhaut (BUCHER u. WARTENBERG, 1997 a). So ist sie im Bereich des Zehenballens als Druck- und Stoßpolster (KARMANN, 2001) besonders stark ausgeprägt, während sie an anderen Stellen, wie z. B. den Wandbereichen der Zehenendorgane, ganz auf das Periost der Phalanx distalis reduziert ist (HABERMEHL, 1996). Die Subkutis besteht aus einem Geflecht lockeren, unregelmäßig angeordneten kollagenfaserigen Bindegewebes. Zwischen diesem Bindegewebe liegen zahlreiche Gefäße und Nerven sowie Fettgewebe. Verschiedentlich erstrecken sich auch Hautderivate, wie z. B. Drüsen und Haarbälge, bis in die Unterhaut, diese liegen aber in der Regel, tierartlich unterschiedlich, in der Lederhaut (ZIETZSCHMANN, 1943).

#### FUNKTION DER UNTERHAUT UND IHRER GEFÄßE

Neben den bereits genannten mechanischen Funktionen (Druck- und Stoßpolster, Verbindungs- und Verschiebeschicht zur Kutis und Erhalt der Oberflächenkonturen des Körpers) dient die Unterhaut durch ihre Fetteinlagerung auch als Energiereserve und Wärmeisolationsschicht (SCHWARZ et al., 1981). Zusätzlich sorgt ein lockeres Gefäßgeflecht, das sogenannte Rete arteriosum et venosum subfasciale, für einen guten Stoffaustausch in diesem Bereich der Haut. Aus den Unterhautgefäßen ziehen Äste in die Lederhaut und bilden an der Grenzfläche zwischen Dermis und Subkutis das Rete arteriosum et venosum dermidis profundum (tiefer dermaler Gefäßplexus) (LOEFFLER, 1966; YEN u. BRAVERMANN, 1976).

Durch den hohen Gehalt an ungeformten Interzellulärsubstanzen (Glykosaminoglykane) kann die Unterhaut viel Wasser binden und sorgt somit für eine gute Diffusion und Regulation des Wasserhaushaltes (SCHWARZ et al., 1981; LIEBICH, 1990). Freie Zellen, wie z. B. Lymphozyten, Histiozyten und Plasmazellen, übernehmen lokale immunologische Funktionen.

### **2.3 SPEZIELLE DEFINITION UND FUNKTION DER ZEHENENDORGANE**

Im Zusammenhang mit der Verwendung spezieller Termini *technici* für die Beschreibung der Zehenendorgane und ihrer Strukturen ist es während der letzten zirka einhundertzwanzig Jahre zu unterschiedlichen Definitionen bestimmter Fachbegriffe gekommen. Die Ursachen dieser Unstimmigkeiten sind vielfältig und sollen hier nicht näher erläutert werden. Die Tabelle im Anhang 1 gibt einen kurzen Überblick über die Mannigfaltigkeit der Definition spezieller Begriffe das Zehenendorgan betreffend.

#### **2.3.1 SPEZIELLE DEFINITION DER ZEHENENDORGANE**

Das Zehenendorgan umfasst den apikalen Teil der distalen Phalanx (SIEDAMGROTZKY, 1870). Bedingt durch die phylogenetische Aufrichtung des Fußes der landlebenden Säuger lassen sich grundsätzlich drei Arten der Fußung bzw. des Fußes unterscheiden. Auf den PLANTIGRADEN Fuß des Sohlengängers (z. B. Mensch) folgte der DIGITIGRADE Fuß des Zehengängers (z. B. Fleischfresser) und der UNGULIGRADE Fuß des Zehenspitzengängers (z. B. Rind und Pferd) (WILLE u. WILKENS, 1995). Neben der unterschiedlichen Fußung der einzelnen Spezies kam es im Laufe der Phylogenese zu einer funktionellen Anpassung des Zehenspitzenbereiches. Hiernach lassen sich wiederum unter den Säugetieren die UNGUATA (Nagelträger) von den UNGUICULATA (Krallenträger) und den UNGULATA (Huftiere) differenzieren (ZIETZSCHMANN, 1918; PETERSEN, 1935).

Das Zehenendorgan (Nagel, Kralle, Klaue oder Huf) kann des Weiteren in ein Zehenendorgan „IM ENGEREN SINNE“ und ein Zehenendorgan „IM WEITEREN SINNE“ eingeteilt werden. Für die Begriffe der verschiedenen Zehenendorgane gibt es im Laufe der vergangenen Jahrzehnte bezüglich ihrer eng gefassten oder ihrer weit gefassten Definitionen unterschiedliche Angaben, wobei an dieser Stelle auf die Tabelle im Anhang 1 verwiesen wird.

Im folgenden Text wird unter dem Begriff des Zehenendorganes „im weiteren Sinne“ die von ZIETZSCHMANN (1918) aufgestellte Definition verstanden. Hierbei umfasst das

Zehenendorgan das dritte Zehenglied, das distale Zehengelenk (Articulatio interphalangea distalis), sowie die an der Phalanx distalis ansetzenden Bänder und Sehnen einschließlich der modifizierten Haut inklusiv des Zehenballens. Unter dem Begriff des Zehenendorganes „im engeren Sinne“ werden nur die epidermalen Strukturen verstanden, die sich nach einer Exungulation/Exunguikulation<sup>4</sup> (sogenanntes „Ausschuhen“) von ihrer Unterlage lösen. Je nach angewandter Methode (Wärmemazeration oder Säuremazeration) für die Exungulation ergeben sich hierbei unterschiedliche Ergebnisse (Anhang 1). Zum leichteren Verständnis beziehen sich die Angaben in dieser Arbeit nur auf die durch Säuremazeration (s.a: Material und Methoden) hervorgegangenen vollständig getrennten epidermalen und dermalen Strukturen (KOBAYASHI, 1990). Bei dieser Methode kommt es lediglich zur Auflösung der Basalmembran, wodurch die epidermalen Schichten in ihrer Gesamtheit vollständig erhalten bleiben. Das Ergebnis dieser Exungulation ist der Hornschuh inklusiv der lebenden Anteile der Epidermis.

### **2.3.2 SPEZIELLE DEFINITION DER KRALLE**

Die KRALLE ist das typische Zehenendorgan der Fleischfresser. Wie allgemein für die Zehenendorgane beschrieben, so wird auch die Kralle als Kralle „im engeren Sinne“ oder als Kralle „im weiteren Sinne“ definiert. Die eng gefasste Definition der Kralle umschreibt die aus der Säuremazeration hervorgegangenen epidermalen Gebilde. Diese sind bei der Kralle der Fleischfresser die hornige Krallentüte inklusive der noch lebenden epidermalen Strukturen.

Die KRALLENTÜTE wiederum setzt sich aus der Krallenplatte und der Krallensohle zusammen (ZIETZSCHMANN, 1918). Die Definition des Begriffes der „Kralle im weiteren Sinne“ umfasst das dritte Zehenglied (Krallenbein), das distale Zehengelenk (Articulatio unguicularis) sowie die am Krallenbein ansetzenden Bänder und Sehnen einschließlich der modifizierten Haut inklusive des Krallenwalles und des Zehenballens (ZIETZSCHMANN, 1918). Wie im allgemeinen Teil speziesübergreifend beschrieben, verstehen ZIETZSCHMANN (1918 u. 1945) sowie HABERMEHL (1996) den Begriff der Kralle bei weit gefasster Definition als Synonym zu den Begriffen „Zehenendorgan“, „Phalangenendorgan“ oder „Distalorgan“. Diese Gleichsetzung ist nach SEIDEL (1992) aus

---

<sup>4</sup> Der Begriff der Exungulation gilt eigentlich nur für das „Ausschuhen“ von Huf und Klaue. Für ein leichteres Verständnis des Textes wird der Ausdruck der Exungulation jedoch als allgemeingültiger Begriff für das „Ausschuhen“ von Huf, Klaue und Kralle angewandt. Der Begriff der Exunguikulation gilt ausschließlich für das „Ausschuhen“ der Kralle und wird auch in der folgenden Arbeit entsprechend verwendet.

vergleichend-anatomischer Sicht nur für die Zehenendorgane Huf und Klaue, nicht jedoch für die Fleischfresserkralle gegeben. Der Autor beschreibt die Krallen bei weit gefasster Definition ohne den Zehenballen, da dieser bei der Exunguikulation an der Zehe verbleibt. SEIDEL (1992) weist jedoch darauf hin, dass der Zehenballen in Übereinstimmung mit BOAS (1881 u. 1894), der die Krallen als ein zusammengesetztes Organ ansieht, zum Zehenendorgan gerechnet werden muss.

In der folgenden Arbeit wird die weit gefasste Definition der Fleischfresserkralle nach ZIETZSCHMANN (1918) verwendet, welche als Synonym zu dem Begriff des Zehenendorganes anzusehen ist und damit den Zehenballen einbezieht.

### 2.3.3 FUNKTIONEN DER ZEHENENDORGANE

Die Zehenendorgane haben sich im Laufe ihrer Entwicklungsgeschichte in Form und Funktion den speziesspezifischen Bedürfnissen angepasst. Die Funktionen, welche die einzelnen Zehenendorgane bei den jeweiligen Spezies zu erfüllen haben, sind sehr vielfältig. Die Nutzung als Waffe, Grab-, Schar- oder Tastorgan geben nur einige kurze Beispiele für die Mannigfaltigkeit der Funktion dieser Organe. Allen Zehenendorganen gemein ist die „konstruktive Einheit von Haut und Bewegungsapparat“ (PETERSEN, 1935), sowie die Funktion als mechanischer Schutz für die Extremitätenspitze (ZIETZSCHMANN, 1918; WILLE u. WILKENS, 1995).

Dabei kommt dem Zehenendorgan des Zehenspitzengängers (Huf und Klaue) eine besondere Bedeutung zu. Durch die phylogenetische Entwicklung dieser Tierarten zum Zehenspitzengänger lastet die gesamte Körperlast der Tiere nur noch auf den Zehenendorganen. Durch die spezielle Umgestaltung besonders im Bereich des Zehenballens erfüllt das Zehenendorgan der Zehenspitzengänger vornehmlich eine stossbrechende Wirkung, während erst sekundär die Funktion als Waffe zum Tragen kommt (BOAS, 1883). Im Bereich des Zehenendorganes der Fleischfresser kommt nur dem Zehenballen eine Tragefunktion zu (BOAS, 1884). Die Hauptaufgaben des Zehenendorganes der Zehengänger liegt vornehmlich in einer Grab-, Schar-, Kletter-, Greif- oder Hängefunktion, sowie als Gebrauchswaffe für Angriff oder Verteidigung (ZIETZSCHMANN, 1918; HABERMEHL, 1996).

Neben den eben genannten Funktionen der Zehenendorgane der Krallentiere (Unguiculata) und der Huf- resp. Klautentiere (Ungulata) kommt dem Zehenendorgan der Nageltiere (Unguata) eine weitere bedeutende Aufgabe zu. Durch die Einlagerung spezifischer

Tastorgane im Bereich der Fingerbeere (PETERSEN, 1935) sind die Primaten in der Lage, den Finger als Tastorgan einzusetzen. Ähnliche Möglichkeiten sind für den Zehenballen der Katze beschrieben worden. Auch sie besitzt die Fähigkeit, durch die Einlagerung von Vater-Pacini-Lamellenkörperchen in den Zehenballen Druck- und Vibrationsreize aufzunehmen (HABERMEHL, 1996; LIEBICH, 1990).

Zudem kommt dem Zehenballen der Kaniden und Feliden sowie dem Strahl der Equiden durch die Einlagerung ekkriner Drüsen eine weitere Bedeutung als Duft- und Markierungsorgan zu. Zahlreiche Drüsen kommen auch in der Fingerbeere des menschlichen Tastballens vor, hierbei handelt es sich jedoch um Schweiß- und weniger um Duftdrüsen (HABERMEHL, 1996).

#### **2.3.4 SPEZIELLE FUNKTION DER HUNDEKRALLE**

Im Gegensatz zur Katzenkralle dient die HUNDEKRALLE hauptsächlich als Scharr- und Grabwerkzeug. Während die Katzenkralle durch die Kontraktion der *Mm. flexores digitales superficialis et profundus* (WÜNSCHE u. PREUSS, 1972) sich in einer kontinuierlichen Schonstellung befindet, hat die Hundekralle ständigen Kontakt mit dem Untergrund. Dieser andauernde Bodenkontakt der Kralle führt zu Abnutzungserscheinungen an der Krallenspitze, welche die Kralle stumpf werden lassen (HABERMEHL, 1996). Je nach Grad des Verschleißes der Hundekralle<sup>5</sup> ist der Gang des Tieres auf hartem Untergrund mehr oder weniger deutlich akustisch wahrzunehmen. Im Gegensatz dazu steht die lautlose Bewegung der Katze.

Eine Besonderheit der Fleischfresserkralle ist die Ausbildung des Rückenwulstes (SIEDAMGROTZKY, 1870; DOBLER, 1969) (s. a.: 2.4.3.2 Die Oberhaut (Epidermis) und Lederhaut (Dermis) in den Segmenten der Hundekralle). SIEDAMGROTZKY (1870) beschreibt bei größeren Hunderassen einen flacheren Rückenwulst, während er an der Kralle kleinere Hunderassen einen stärker ausgeprägten Rückenwulst erkennt. Aus der Verschiedenartigkeit der Ausbildung des Rückenwulstes der Hundekralle zieht SIEDAMGROTZKY (1870) den Schluss, dass ein Zusammenhang zwischen der Nutzung der Kralle und ihres Aufbaues besteht. Große Hunderassen laufen mehr und brauchen deshalb nicht so einen kräftig ausgeprägten Rückenwulst, während kleinen Hunderassen neben dem Laufen ihre Krallen auch noch verstärkt zum Graben nutzen, weshalb sich hier der kräftigere Rückenwulst der Kralle ausgebildet hat. In anderen Literaturangaben lässt sich eine derartige

---

<sup>5</sup> Das Krallenhorn eines Beagels wächst bis zum zweiten Lebensjahr durchschnittlich 1,9 mm in der Woche. Mit zunehmendem Alter nimmt das Wachstum der Krallentüte jedoch ab (MULLER et al., 1993 b).

Korrelation zwischen der Nutzung der Krallen und der Ausbildung des Rückenwulstes nicht finden oder sie wird ganz verneint (GÜCKEL, 1922).

#### **2.4 DIE PHYLOGENESE DER ZEHENENDORGANE, HOMOLOGIE/HOMONOMIE**

Die Krallen werden als die ursprünglichste Form der Zehenendorgane aller landlebenden Wirbeltiere, also auch des Säugetieres, angesehen (BOAS, 1881; ZIETZSCHMANN, 1918 u. 1943, HAMRICK, 2001).

Aus der Krallenplatte (Textabb. 2) entwickelte sich einerseits durch Rückbildung der Krallensohle der Nagel, andererseits durch eine Verstärkung der Krallenplatte und der Sohle Klaue und Huf (BOAS, 1881).

Die Beurteilung der Phylogenese der Zehenendorgane erfolgt nach den Prinzipien der Homologie<sup>6</sup>/Homonomie<sup>7</sup>.

Die HOMOLOGIE befasst sich mit dem Wiedererkennen herkunftsgleicher Strukturen in verwandten Organismen (PREUSS, 1957; HOMBERGER, 2002) (z. B. Zehenendorgane der Extremitäten verschiedener Wirbeltiere). Der Begriff der HOMONOMIE dient der Gleichbenennung homologer Strukturen verschiedener Organismen (z. B. Wirbel eines Wirbeltieres) (KÄMPFE u. BERNHARDT, 1992).

Ähnlichkeiten in der Funktion (z. B.: Insektenflügel und Vogelflügel oder Lunge und Fischkieme) stellen lediglich analoge<sup>8</sup> Strukturen dar. Eine Gleichartigkeit der Funktion allein stellt also kein Homologiekriterium dar (ROMER, 1976; HOMBERGER, 2002). Zur Beurteilung einer Organhomologie wird die anatomische Lage in Verbindung mit der Beziehung zu den Nachbarorganen und die Ähnlichkeit in der Ontogenese der Organe berücksichtigt.

Die Homologie stellt einen Erfahrungswert dar, der sich bei der Auswertung von spezifischen Strukturen innerhalb der Entwicklung eines Organes bei verschiedenen Spezies ergibt. Die Auswertung der einzelnen Teile erfolgt nach einem immer gleich anzuwendenden Schema. Dabei wird den Strukturen durch die Anwendung bestimmter Haupt- und Nebenkriterien ein bestimmter empirisch gewonnener Rang zugeordnet (REMANE et al., 1974). Für die spätere

---

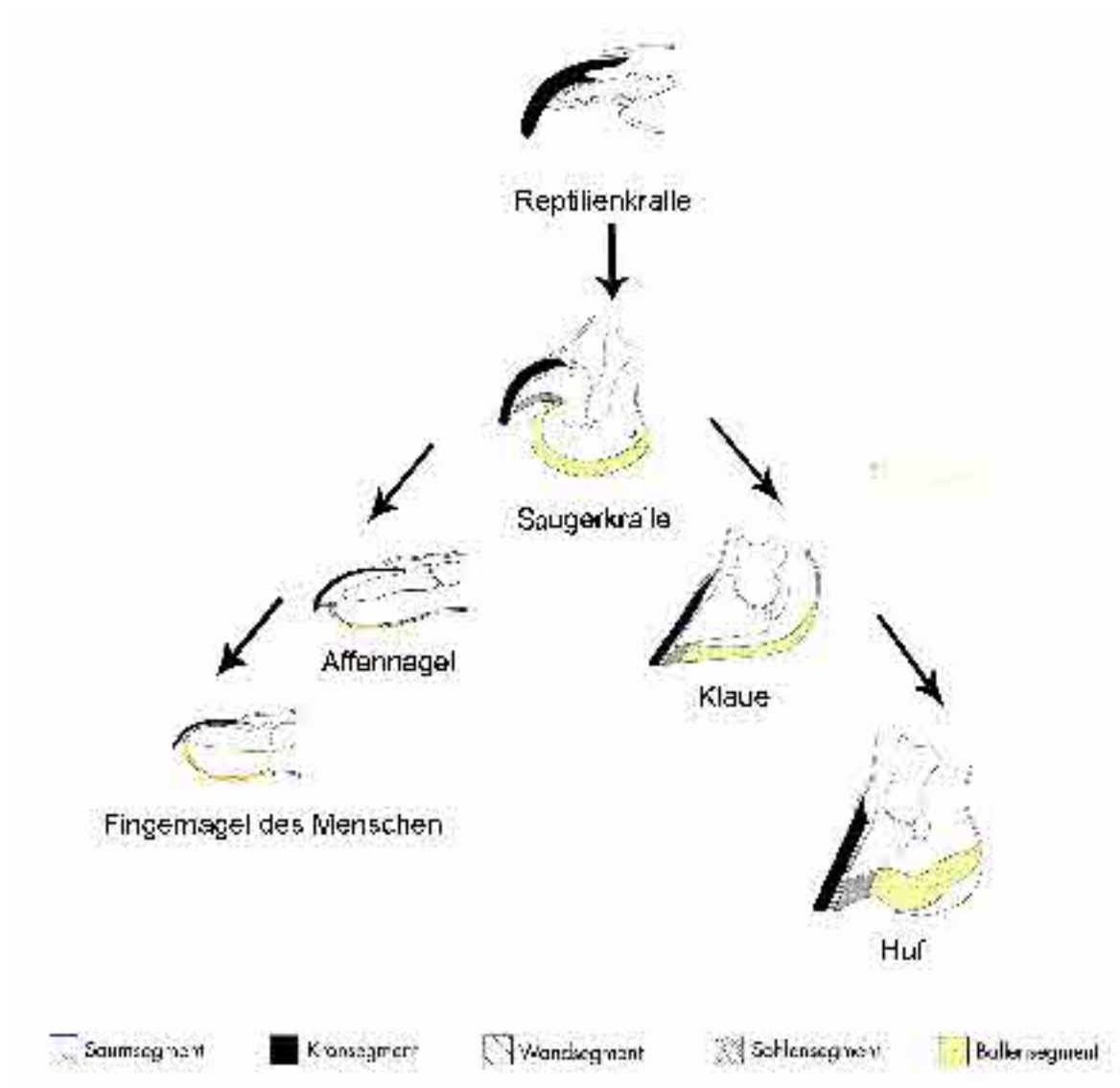
<sup>6</sup> griechisch: homoios = gleich, gleichartig entsprechend; -logie: als Grundwort zusammengesetzter weiblicher Substantive mit der Bed. „Lehre, Wissenschaft“

<sup>7</sup> nomos = Name

<sup>8</sup> griechisch- latein: analogia (Subst.) = Entsprechung, Gleichartigkeit, Übereinstimmung



Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist eine genaue Definition der Haupt- und Nebenkriterien unabdingbar.



### **TEXTABBILDUNG 2:**

Schematische Darstellung der Segmentgliederung und Phylognese der Zehenendorgane Reptilienkralle, Säugerkralle, Affennagel, Nagel des Menschen, Klaue und Huf im Längsschnitt; modifiziert nach ZIETZSCHMANN (1918) und MÜLLING (1993).

Eine absolute Homologie liegt dann vor, wenn die Gene zwischen den einzelnen Generationen unverändert (also ohne Mutationen innerhalb der Gene) bleiben und damit auch die von ihnen hervorgerufenen Organe unverändert sind (ROMER, 1976; HOMBERGER, 2002; HAMRICK, 2001). Als homologe Strukturen werden aber auch solche Strukturen bezeichnet, deren Gene sich als identisch herausstellen, ihre Struktur und Funktion aber von den ursprünglichen Formen resp. Funktionen des Organes abweicht (z. B.: das erste

Flügelpaar (Flugflügel) und das zweite Flügelpaar (Schwingkölbchen) einer Fliege) (HOMBERGER, 2002). Solche Veränderungen treten in der Phylogenese als Anpassung an die jeweilige Umweltsituation auf (STARCK, 1978).

Zu den allgemeinen Hauptkriterien für die Beurteilung homologer Strukturen zählt REMANE (1974) die Lage (Homotopie<sup>9</sup>), die spezielle Qualität der Strukturen (Homomorphie<sup>10</sup>) und die Verknüpfung durch Zwischenformen (Stetigkeitskriterium). Die Wahrscheinlichkeit der Homologie (und daraus abgeleitet die Homonomie) wächst mit der Zahl der das Merkmal aufweisenden verwandten Arten und mit dem Vorhandensein weiterer Ähnlichkeiten von gleicher Verbreitung bei nächst ähnlichen Arten. Die Wahrscheinlichkeit der Homologie von Merkmalen sinkt jedoch mit der Häufigkeit des Auftretens dieses Merkmals bei sicher nicht verwandten Arten (REMANE, 1974). Neben den Begriffen der Homologie/Homonomie existiert noch der Begriff der Homoiologie (KÄMPFE u. BERNHARDT, 1992). Die Homoiologie bezeichnet unabhängig erworbene morphologische und physiologische Ähnlichkeiten von Strukturen bei Tieren verschiedener Spezies. Es handelt sich also um parallel entwickelte Strukturen an homologen Organen (z. B.: Knochenleiste auf dem Schädel von Gorilla und Hyänen). Phylogenetisch sind dies strukturelle Ähnlichkeiten mit analogem Charakter, die sich an homologen Organen verschiedener Arten unabhängig ausbilden (KÄMPFE u. BERNHARDT, 1992).

#### **2.4.1 DIE GLIEDERUNG DER ZEHENENDORGANE IN SEGMENTE**

Die Zehenendorgane Krallen, Nagel, Klaue und Huf setzen sich, ebenso wie die behaarte Haut (Integumentum commune) aus den drei aufeinander folgenden Schichten - Unterhaut, Lederhaut und Oberhaut - zusammen. Neben dieser Gliederung in die drei Hautschichten lassen sich die Zehenendorgane vergleichend anatomisch aufgrund struktureller Besonderheiten innerhalb der einzelnen Hautabschnitte in spezifischen Bereichen des Zehenendorganes in Segmente einteilen. Dabei geht die Bedeutung der Segmenteinteilung weit über ein rein akademisches Interesse hinaus. Sie erlangt zudem Bedeutung auf dem Gebiet der Grundlagenforschung und der klinischen Forschung (MÜLLING, 1993).

Als Segmente werden sich aneinanderreihende Regionen des Zehenendorganes bezeichnet, die sich jeweils aus einem vollständigen Hautabschnitt (Oberhaut, Lederhaut und Unterhaut) entwickeln (ZIETZSCHMANN, 1918). Die Einteilung der Segmente erfolgt nach den Prinzipien der Homologie/Homonomie. Neben der Betrachtung des ausdifferenzierten

---

<sup>9</sup> griechisch: topos (Adj.) = örtlich; (Subst.) = Ort, Platz, Gegend

<sup>10</sup> griechisch: morph- (Subst.) = Gestalt, Form, Erscheinung

Zehenendorganes kann eine Betrachtung des sich entwickelnden Zehenendorganes für eine Homologisierung mit anderen Zehenendorganen und damit für eine genaue Einordnung bestimmter Strukturen in Segmente von besonderer Bedeutung sein. Unter der Anwendung dieser speziellen Homologiekriterien ergeben sich für Huf und Klaue ein Saum-, Kron-, Wand-, Sohlen- und Ballensegment (Textabb. 2). Ein Ballensegment ist für den Nagel nicht beschrieben, am Fingernagel des Menschen soll auch ein Sohlensegment fehlen (BLOOM u. FAWCETT, 1975). Die spezielle Segmenteinteilung der homologen Zehenendorgane Krallen, Nagel, Huf und Klaue sind in den Anhängen 2 bis 6 aufgelistet. Dabei wird deutlich, dass teilweise immer noch große Uneinigkeiten in der Literatur bezüglich der Segmenteinteilung und der Begriffsbestimmungen einzelner Strukturen bestehen.

#### **2.4.2 DIE ALLGEMEINE EINTEILUNG DER KRALLE IN SEGMENTE**

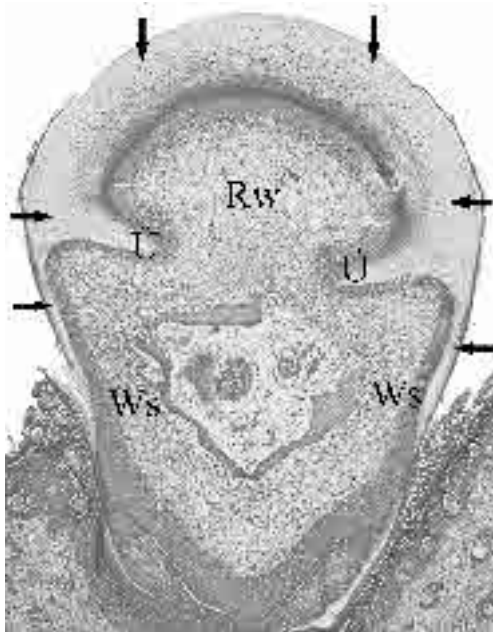
Unter Anwendung der entsprechenden Homologiekriterien der homologen Zehenendorgane Huf und Klaue ergibt sich auch für die Krallen ein SAUM-, KRON-, WAND- und SOHLESEGMENT.

Über die Definitionen der einzelnen Segmentabschnitte der Hundekralle gibt es in der Literatur unterschiedliche Angaben (s. a.: Anhänge 1 bis 6). Dieses kann unter anderem darauf zurückzuführen sein, dass bis dato nur die Krallen adulter Hunde zur Einteilung einzelner Krallenbereiche in Segmente hinzugezogen wurde. Die Einbeziehung des foetalen und perinatalen Zehenendorganes für dessen Segmenteinteilung, wie sie bereits für andere Zehenendorgane, wie z. B. für den Huf des Pferdes (BRAGULLA, 1996) oder die Krallen der Katze (ERNSBERGER, 1998) vorgenommen wurde, ist bisher für die Krallen des Hundes nicht geschehen. Dies liegt daran, dass die Ontogenese der Hundekralle bisher noch nicht untersucht wurde.

Die größten Unstimmigkeiten in der Segmenteinteilung der Hundekralle bestehen einerseits in der Zuordnung des Rückenwulstes (Textabb. 3) zu einem bestimmten Segment, andererseits in der offenen Frage der Existenz eines Ballensegmentes als Teil der Hundekralle.

Je nach Auswahl des dominierenden Homologiekriteriums wird dieser Rückenwulst zum Wand- oder zum Kronsegment gerechnet. SIEDAMGROTZKY (1870), BOAS (1894), ZIETZSCHMANN (1918), DOBLER (1969) und HABERMEHL (1996) stellen die Hornbildungsrate als Wertungskriterium für die Segmenteinteilung in den Vordergrund. Da die Bildung des Hornes für die Krallenplatte von der Krallenkrone sowie dem Rückenwulst ausgeht, zählen diese Autoren den Rückenwulst zum Kronsegment. Wird jedoch die

Ausbildung des segmentspezifischen Papillarkörpers als Hauptkriterium herangezogen, dann wird der Rückenwulst durch seinen blättchenförmigen Papillarkörper, wie er auch für das Wandsegment typisch ist, zum Wandsegment gerechnet (GÜCKEL, 1922; SEIDEL, 1992).



**TEXTABBILDUNG 3:**

Querschnitt durch die Kralle eines geburtsreifen Hunde-foeten. HE-Färbung. Dieser Querschnitt gibt eine Übersicht über die Ausbildung des für die Fleischfresserkralle typischen Rückenwulstes (Rw). Der Rückenwulst erhebt sich als bindegewebiger Wulst pilzartig auf dem Krallenrücken. Eine beidseitig laterale konkave Einbuchtung bildet den Übergang (Ü) in den Wandbereich (Ws) der Kralle. Durch ein ausgleichendes Wachstum der Epidermis erscheint die Krallentüte auf ihrer äußeren Oberfläche als ein glattes, konvex gebogenes Gebilde. Die Pfeile deuten auf die hornige Krallentüte.

Die Kralle ist ein zusammengesetztes Organ und schließt bei weit gefasster Definition den dorsalen und palmaren Teil des Krallenwalles und damit auch den Zehenballen mit ein (BOAS, 1894; ZIETZSCHMANN, 1918). Dies führt ZIETZSCHMANN (1918) und HABERMEHL (1996) zu der Schlussfolgerung, dass man den Zehenballen an der Hundekralle als Ballensegment bezeichnen kann. SEIDEL (1992) und BUDRAS (1999) betrachten den Zehenballen als separate Struktur (s. a.: 2.3.2 Definition der Kralle), was das Vorhandensein eines Ballensegmentes an der Hundekralle ausschließt.

Die aufgeführten Unstimmigkeiten über die Segmenteinteilung der Hundekralle verdeutlichen die Notwendigkeit einer genauen Definition und Rangfolge der angewandten Homologiekriterien, sowie eine erneute Betrachtung der Kralle des Hundes, um bestehende kontroverse Punkte unter Berücksichtigung der Krallenentwicklung neu zu diskutieren.

### **2.4.3 MESOSKOPISCHE<sup>11</sup> UND MIKROSKOPISCHE ANATOMIE DER ADULTEN HUNDEKRALLE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER EINTEILUNG IN IHRE SEGMENTE**

In der Literatur wird die Hundekralle häufig unter der gemeinsamen Überschrift der Fleischfresserkralle abgehandelt, wobei darunter meist die Hunde- und die Katzenkralle verstanden wird. Sowohl ältere (SIEDAMGROTZKY, 1870) als auch neuere (SEIDEL, 1992; ERNSBERGER, 1998) Arbeiten zeigen jedoch, dass erhebliche Unterschiede im Aufbau und in der Funktion zwischen der Hunde- und der Katzenkralle bestehen. Mit diesem Wissen ist eine Vereinheitlichung der Betrachtung der Hunde- und der Katzenkralle nicht mehr vertretbar.

Die folgende Beschreibung der Hundekralle fasst die mesoskopischen und mikroskopischen Befunde zur Hundekralle unter Berücksichtigung der Einteilung in ihre Segmente zusammen. Dabei wird die Definition der „Kralle im weiteren Sinne“ nach ZIETZSCHMANN (1918) verwendet und im folgenden Text das dritte Zehenglied (Krallenbein), das distale Zehengelenk (*Articulatio unguicularis*) sowie die am Krallenbein ansetzenden Bänder und Sehnen einschließlich der modifizierten Haut inklusive des Krallenwalles und des Zehenballens als Ballensegment beschrieben.

Das KRALLENBEIN bildet die knöcherne Grundlage des Zehenendorganes (ZEITZSCHMANN, 1918; HABERMEHL, 1996). Ihm folgen in unterschiedlicher Ausprägung von innen nach außen Unterhaut, Lederhaut und Oberhaut. Die Oberhaut verhält sich wie eine MATRIZE zu den darunter liegenden Strukturen (ZIETZSCHMANN, 1918; HABERMEHL, 1996). Die PATRIZE wird dabei vom Knochen mit den darüber liegenden Schichten der Subkutis und der Dermis gebildet (ZIETZSCHMANN, 1918; HABERMEHL, 1996). Leider gibt es über die vergangenen Jahrzehnte hinweg in der Literatur bezüglich der Begriffe der Kralle und ihrer einzelnen Strukturen unterschiedliche Definitionen, wobei an dieser Stelle noch einmal auf den Anhang 1 verwiesen wird. Solch abweichende Definitionen haben ihren Ursprung häufig in differenten Arbeitsmethoden (vergleiche dazu z. B. Säure- und Wärmemazeration), welche den daraus folgenden unterschiedlichen Ergebnissen zugrunde liegen. Dabei werden leider auch nicht immer die angewandten Arbeitsmethoden angeführt, was zudem eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert.

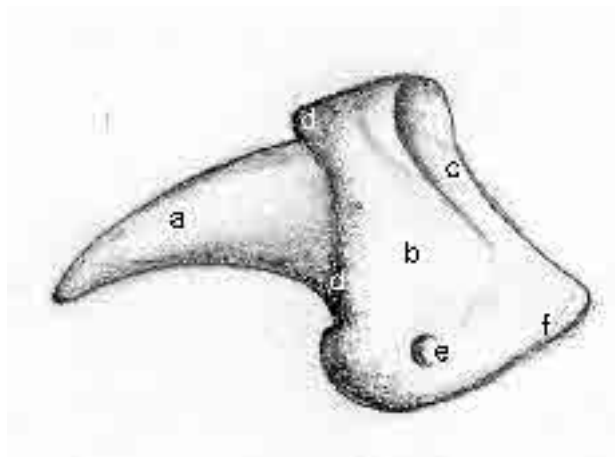
Folgend werden zum besseren Verständnis die für den weiteren Text relevanten Begriffe in ihrer hier weiter verwendeten Definition kurz erläutert.

---

<sup>11</sup> Mit der Mesoskopie wird der Grenzbereich zwischen makroskopischer und mikroskopischer Anatomie abgedeckt, der mit Hilfe einer Lupe erfassbar ist.

Hiernach wird unter dem Krallenbett der Papillarkörper der Dermis verstanden (ZIETZSCHMANN, 1943; SEIDEL, 1992). Die Krallenmatrix (SEIDEL, 1992) beschreibt, wie am menschlichen Nagel die Nagelmatrix (LEONHARDT, 1990; BUCHER u. WARTENBERG, 1987 a), die lebende, im Dienste der Keratinisierung stehende Epidermis. Weitere, häufig verwendete Begriffe sind das Steril-Fertilbettkonzept, bzw. die Bezeichnungen Sterilbett und Fertilbett. Die letztgenannten Begriffe lassen sich nur verstehen, wenn man ihren Ursprung kennt, und sind aus heutiger Sicht veraltet. Die Bezeichnungen des Fertil-, sowie des Sterilbettes beruhen auf dem Ursprung, als man unter dem „Bett“ die Lederhaut, einschließlich der epidermalen Matrix (der noch lebenden Epidermiszellen) verstanden hat (SIEDAMGROTZKY, 1870; BOAS, 1894; ZIETZSCHMANN, 1918). Demnach sollte das Fertilbett den Krallenbereich umschreiben, der eine hohe Hornbildungsrate aufweist, wohingegen der sterile Teil der Kralle den Bereich mit einer geringen oder gar keinen Hornbildungsrate charakterisieren sollte (ZIETZSCHMANN, 1918; GÜCKEL, 1922; TRAUTMANN u. FIEBIGER, 1931; KRÖLLING, 1960, HABERMEHL, 1996).

#### 2.4.3.1 KRALLENBEIN



#### **TEXTABBILDUNG 4:**

Lateralansicht auf das Krallenbein eines adulten Hundes, modifiziert nach WILLE u. WILKENS (1995). Krallenbeinfortsatz (a); Krallenbeinbasis (b); Gelenkfläche (c); knöchernen Krallenleiste (d); Krallenloch (e); Bandhöcker (f).

Das KRALLENBEIN (*Os unguiculare sive Phalanx tertia sive Phalanx distalis*) bildet die knöchernen Grundlage des Zehenendorgans des Hundes. Seine vollständige Ausprägung hat das Krallenbein erst mit einem Alter von zirka 150 Tagen post natum erreicht (SCHAEFFER, 1934). Es ist dem mittleren Zehenglied durch die konkav gekrümmte Gelenkfläche (*Facies articularis*) unter einem rechten Winkel angefügt (SIEDAMGROTZKY, 1870). Das Krallenbein wird in eine proximale Krallenbeinbasis inklusive Gelenkfläche, Sehnenansätzen

(Tuberculum flexorium) und Krallenleiste (Crista unguicularis), sowie einen distalen Krallenbeinfortsatz (Processus unguicularis) unterteilt (BUDRAS et al., 1986). Seitlich ist der Krallenbeinfortsatz komprimiert. Nach apikal krümmt sich die Phalanx tertia leicht konvex und spitzt sich kegelförmig zu (SIEDAMGROTZKY, 1870). Am Krallenbeinfortsatz sind zwei Wandflächen (Facies parietales) von einem Rücken (Dorsum) und einer Sohlenfläche (Facies solearis) zu unterscheiden (WILLE u. WILKENS, 1995). Am Rückenteil wird sowohl die Ausprägung eines Kammes (SIEDAMGROTZKY, 1870) als auch das Auftreten einer Dorsalrinne oder -spalte (ZIETZSCHMANN, 1918) beschrieben. Am wulstförmigen Krallenbeinkörper befindet sich palmar bzw. plantar am Proximalrand der Ballenhöcker (Tuberculum flexorium). Dorsolateral liegt die Krallenleiste (Crista unguicularis). Diese Krallenleiste umfasst den nach distal gerichteten Krallenfalz (Sulcus unguicularis). Die Ausprägung der Krallenleiste an der Kralle eines juvenilen Hundes setzt erst 49 Tage post natum ein und ist mit einem Alter von 150 Tagen post natum abgeschlossen (SCHAEFFER, 1934). Medial und lateral vom Ballenhöcker sind zwei Gefäßlöcher ausgebildet, welche den Durchtritt der Zehenendarterien in das Krallenbein ermöglichen (WILLE u. WILKENS, 1995). Nach Durchtritt der Gefäße durch das jeweilige Gefäßloch (Foramen soleare) verlaufen sie weiter als Arcus terminalis innerhalb des im Phalangenkörper liegenden Canalis solearis<sup>12</sup>.

Bei alten Hunden wird eine weitere Knochenlamelle innerhalb des Krallenwalles beschrieben, welche in Verbindung mit dem Krallenbein steht (GÜCKEL, 1922).

Der Winkel zwischen der Phalanx media und der Phalanx distalis an der Zehe der Katzenpfote ist sehr viel geringer als der der Hundepfote. Andererseits ist wiederum der Krallenfalz an der Katzenkralle sehr viel stärker ausgebildet und damit der Sulcus unguicularis wesentlich tiefer als an der Hundekralle. Der Processus unguicularis der Katzenkralle ist in Längsachse stärker gekrümmt, kürzer und in seitlicher Richtung stärker komprimiert (SIEDAMGROTZKY, 1870). Bei Großkatzen wird beobachtet, dass dorsal auf diesem Processus unguicularis im Grunde des Knochenfalzes ein kleiner Knochenkegel liegt, der dem bindegewebigen Rückenwulst als Grundlage dienen soll (SIEDAMGROTZKY, 1870).

---

<sup>12</sup> Laut den Nomina Anatomica Veterinaria bildet der Canalis solearis den knöchernen Kanal, während der Arcus terminalis von den Gefäßen gebildet wird und im Canalis solearis liegt. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird fälschlicherweise häufig auch der Begriff des Arcus terminalis für den knöchernen Kanal benutzt. Dabei sei zudem noch angemerkt, dass auch der Begriff des Canalis solearis nicht ganz korrekt ist, da der knöcherne Kanal weitaus mehr Regionen umfasst als nur den Sohlenabschnitt.

### **2.4.3.2 DIE OBERHAUT (EPIDERMIS) UND LEDERHAUT (DERMIS) IN DEN SEGMENTEN DER HUNDEKRALLE**

#### SAUMSEGMENT

Das Saumsegment liegt als haar- und drüsenloser Abschnitt im Innenteil des Krallenwalles (Vallum, Sinus unguicularis). Seine Ausdehnung reicht vom Rand der Krallenleiste (Crista unguicularis) bis zum Grund des Krallenfalzes (Sulcus unguicularis) (SEIDEL, 1992).

Im Gegensatz zu anderen homologen Zehenendorganen (Huf, Klaue) ist beim adulten Hund die DERMIS des Saumsegmentes fest mit dem Periost der Krallenleiste (Crista unguicularis) und des Krallenfalzes (Sulcus unguicularis) verbunden. Im proximal verborgenen Rand (Margo occultus) schlägt sich das Saumsegment nach distal auf den Krallenbeinfortsatz um. Dort besteht eine direkte Verbindung zum Krallenbeinfortsatz (Processus unguicularis) (SIEDAMGROTZKY, 1870; SEIDEL, 1992). Rasterelektronenmikroskopisch sind undeutlich angedeutete warzenförmige Zöttchenstrukturen der Dermis zu erkennen (BUDRAS u. SEIDEL, 1992). Die Gefäßarchitektur in der Lederhaut des Saumsegmentes der Hundekralle wurde bisher in der Literatur noch nicht beschrieben.

Die EPIDERMIS bildet die äußerste Schicht der Saumhaut. Diese Saumepidermis ist nicht pigmentiert und erzeugt unter Ausbildung eines Stratum granulosum (SEIDEL, 1992; ERNSBERGER, 1998) eine dünne Hornschicht. Diese wird auch als Eponychium oder Glasurschicht bezeichnet (SIEDAMGROTZKY, 1870). Entsprechend der Differenzierung der Keratinozyten der homologen Zehenendorgane von Huf und Klaue, differenzieren sich auch die Epithelzellen des Saumsegmentes der Kralle nach dem Prinzip der weichen Verhornung (SEIDEL, 1992; ZIETZSCHMANN, 1918). Dabei erfolgt der Übergang in das Stratum corneum sprunghaft (SEIDEL, 1992). Die Horngrenze verläuft in einer unregelmäßigen Linie. Das Saumhorn ist direkt mit der Krallenplatte „verklebt“ (TRAUTMANN, 1949; ZIETZSCHMANN, 1918) und wird mit ihr distal geschoben, wo diese durch den Gebrauch der Kralle sehr bald abgenutzt wird (HABERMEHL, 1996).

Die Verhältnisse des Saumsegmentes sind bei der Katzenkralle etwas komplexer als in der Hundekralle. Neben dem haar- und drüsenlosen Krallenwall existiert noch eine weitere, jedoch behaarte Hautfalte, welche sich beim Ausfahren der Kralle in ihrer Ausdehnung verändert. Damit bilden die beiden Hautfalten eine äußere (Sinus unguicularis externus) und eine innere Krallentasche (Sinus unguicularis internus) (ERNSBERGER, 1998). Die eigentliche Saumfalte besteht jedoch nur aus dem inneren haar- und drüsenlosen Teil (ERNSBERGER, 1998). Das Saumsegment der Katzenkralle reicht jedoch nicht bis ganz in



den Krallenfalzgrund hinein. Die Saumsegmentepidermis wird bei der Katze in zwei Abschnitte untergliedert: das proximal liegende Saumsegmentepithel, welches dem Prinzip der harten Verhornung unterliegen soll, und den distalen Teil des Saumsegmentes, welches, wie das Saumsegmentepithel des Hundes unter Bildung eines Stratum granulosum verhornt (ERNSBERGER, 1998). Das harte Horn (Glasurschicht, Eponychium) des proximalen Teiles wird bis zum freien Rand der Saumfalte heruntergeschoben, während das weiche, distal gebildete Horn als Hornwulst das Innere der Krallentasche ausfüllt (ERNSBERGER, 1998).

### KRONSEGMENT

Das Kronsegment schließt sich am Grunde des Knochenfalzes an das Saumsegmentes an (SIEDAMGROTZKY, 1870). Es beginnt lateropalmar als schwacher Wulst (bei einem adulten mittelgroßen Hund zirka 1 mm breit) und verbreitert sich langsam nach dorsodistal (bei einem adulten mittelgroßen Hund zirka 3 mm breit) (ZIETZSCHMANN, 1918; GÜCKEL, 1922; BUDRAS u. SEIDEL, 1992). Damit liegt das Kronsegment unter der Crista unguicularis (Krallenleiste) im Sulcus unguicularis (Krallenfalz). Der Rückenwulst, welcher sich dorsal schnabelförmig auf dem Krallenrücken distal fortsetzt (SIEDAMGROTZKY, 1870; BOAS, 1894, TRAUTMANN, 1949) wird, je nach Wertung der verschiedenen Homologiekriterien für die Segmenteinteilung der Hundekralle, entweder zum Kron- oder zum Wandsegment gezählt und deshalb hier gesondert behandelt (s.u.). Um eventuelle Unstimmigkeiten über den Begriff des Kronsegmentes zu vermeiden, wird im folgenden Text für die Beschreibung des Kronsegmentes ohne Rückenwulst der Begriff des proximalen Teiles des Kronsegmentes eingeführt. Dorsodistal geht dieser proximale Teil der Krallenkrone in den Rückenwulst, laterodistal in das Wandsegment und palmar in die Sohle über (SIEDAMGROTZKY, 1870; BOAS, 1894, TRAUTMANN, 1949; SEIDEL, 1992). Die Dermis des proximalen Bereiches des Kronsegmentes ist direkt mit dem Periost des Krallenbeines verbunden (KRÖLLING, 1960; TRAUTMANN, 1949).

Der bindegewebige PAPILLARKÖRPER des proximalen Teiles des Kronsegmentes der Hundekralle besteht aus zarten, proximodistal ausgerichteten Zöttchen (TRAUTMANN, 1921; DOBLER, 1969; SEIDEL, 1992). Diese sitzen einer feinen Leistenformation<sup>13</sup> auf (SEIDEL, 1992) und werden durch unverzweigte Kapillarschleifen vaskularisiert (DOBLER, 1969). Die den Lederhautleisten aufsitzenden Zöttchen ordnen sich semizirkulär von palmar nach dorsal über dem proximalen Teil des Krallenbeinfortsatzes an. Auf dem Krallenrücken

---

<sup>13</sup> BUDRAS und SEIDEL (1992) benutzen in ihrer Arbeit über die Hundekralle den Begriff der Blättchenformation, diese Blättchen stehen aber eigentlich für größere bindegewebige Formationen, so dass der Begriff der Leisten, um sie später mit anderen Zehenendorganen vergleichen zu können, verständlicher ist.

befinden sich meist vier bis fünf von proximal nach distal hintereinander angeordnete Zöttchenreihen (SEIDEL, 1992). Palmar reduzieren sich diese auf zwei bis drei hintereinanderliegende bindegewebige Zöttchenreihen (SIEDAMGROTZKY, 1870). Zöttchen ohne leistenförmige Basis sind nur gelegentlich zu erkennen (SEIDEL, 1992). Auch der Papillarkörper im Kronsegment der Kralle einer adulten Katze lässt rasterelektronenmikroskopisch feine Zöttchen auf kleinen Leistchen erkennen. Diese sind bei einem Katzenfoetus jedoch noch nicht erkennbar (ERNSBERGER, 1998).

Die Gefäßversorgung der Dermis des proximalen Kronsegmentes erfolgt durch die palmaren, bzw. plantaren Zehenarterien, sowie durch kleine Abzweigungen der dorsalen Zehenarterien und durch aus dem Arcus terminalis abzweigende Äste (BUDRAS, 1999). Die Zehenarterien geben jeweils eine A. coronalis zum Kronsegment ab, welche wiederum durch die Abzweigung weiterer Gefäße den tiefen dermalen Gefäßplexus (zwischen Dermis und Subkutis) bilden. Der tiefe dermale Gefäßplexus steht mit dem oberflächlichen dermalen Gefäßplexus in Verbindung. Dieser oberflächliche dermale Gefäßplexus entlässt wenig oder nicht verzweigte Kapillarschleifen, welche im proximalen Teil des proximalen Kronsegmentes die dermalen Papillen vaskularisieren. Der distale Teil des proximalen Kronsegmentes sowie der Rückenwulst werden von sich leuchterartig verzweigenden, in Längsrichtung ziehenden Gefäßen versorgt (DOBLER, 1969).

Die EPIDERMIS des proximalen Teiles des Kronsegmentes unterliegt einer hohen Hornbildungsrate (SIEDAMGROTZKY, 1870) und bildet zusammen mit dem Horn des Rückenwulstes den Hauptteil des Hornes der „Kralle im engeren Sinne“ und damit der Krallenplatte (SIEDAMGROTZKY, 1870; BOAS, 1894; ZIETZSCHMANN, 1918; SEIDEL, 1992; HABERMEHL, 1996). Dieses von den Epithelzellen des Kronsegmentes gebildete Horn wird auch als Schutzschicht oder Mesonychium bezeichnet. Je breiter und höher die Krallenkrone ist, desto dicker wird die von ihr gebildete Krallenplatte (SEIDEL, 1992).

Die Basalzellen und Parabasalzellen im proximalen Abschnitt des Kronsegmentes liegen an der Krallenbasis und sitzen palisadenförmig einer Basallamina auf (SIEDAMGROTZKY, 1870; SEIDEL, 1992). Von den teilungsfähigen Basalzellen werden ständig neue Tochterzellen produziert. Aufgrund dermo-epidermaler Interaktionen bildet die germinative Epithelzellschicht feine, runde, epidermale Röhrchen<sup>14</sup> aus (SEIDEL, 1992). Die Epidermis

---

<sup>14</sup> Epidermale Röhrchen bilden sich aufgrund der dermo-epidermalen Interaktion in Verbindung mit einem papillenförmigen Papillarkörper aus. Erst die absolute Länge der dermalen Papillen führt auch zur Ausbildung von epidermalen Röhrchen. Da am Kronsegment des Hufes besonders lange Lederhautpapillen bestehen, ist an diesem Zehenendorgan die Ausdifferenzierung von epidermalen Röhrchen besonders deutlich ausgeprägt. Die

des proximalen Teiles des Kronsegmentes differenziert sich ohne Durchlaufen einer Körnerzellschicht, also durch die sogenannte „harte“ Verhornung, zum Stratum corneum (KÜNZEL, 1990; SEIDEL, 1992). Zwischen dem Stratum spinosum und dem Stratum corneum bildet sich eine mindestens vier Zelllagen dicke Schicht aus Übergangszellen. Eine solch zellreiche Schicht tritt immer an Stellen mit einer sehr hohen Hornbildungskapazität auf und stellt den Übergang zwischen lebender und verhornender Epidermis dar (BOAS, 1931; SEIDEL, 1992). Im Kronsegment ist diese Übergangszone im Vergleich zu den anderen Segmenten an der Kralle am deutlichsten ausgeprägt und umfasst teilweise mehr als fünf Zelllagen. Durch den Schub der Zellen nach distal nimmt die Kronepidermis in der kurzen Ausdehnung des Kronsegmentes um etwa die dreifache Dicke zu (SEIDEL, 1992; BUDRAS u. SEIDEL, 1992). Dabei werden die basal in der germinativen Epithelzellschicht gebildeten epithelialen Röhren nach dorsopalmar verformt und sind ab der halben Krallenlänge vollständig verstrichen (SEIDEL, 1992). Die Veränderung der Zellform und der gleichzeitig auftretende Verlust der Zellgrenzen wird in der Literatur als „Strukturverlust“ innerhalb der toten Hornmassen bezeichnet. Dieser Strukturverlust ist abhängig von der Dauer und dem Grad der Aushärtung der Hornzellen und des Interzellularkitts, also der Plastizität des Hornzellverbandes (SEIDEL, 1992). KÜNZEL (1990) und ZIETZSCHMANN (1943) sowie KRÖLLING (1960) beschreiben das Kronhorn des Hundes als „einfach geschichtet und strukturlos“, demnach ohne Ausbildung von Kronhornröhren. Die verhornenden Epidermiszellen des proximalen Kronsegmentes des Hundes werden durch die nachfolgend generierten Epidermiszellen stetig nach distal bis zur Krallenspitze geschoben. Dabei flachen die einzelnen Zellen in Richtung Stratum corneum immer weiter ab und bekommen eine längs ausgerichtete Gestalt. Die verhornte Krallenspitze wird durch ihren stetigen Kontakt mit dem Erdboden abgenutzt und dadurch abgestumpft (ZIETZSCHMANN, 1918).

Im Gegensatz zum Saumhorn ist das Horn des Kronsegmentes bei den meisten Hunderassen pigmentiert (SIEDAMGROTZKY, 1870; FREWEIN u. WALLER-BERGER, 1994). Ausnahmen stellen unter anderen der Dalmatiner und die Gefleckte Deutsche Dogge dar (WILLE u. WILKENS, 1995), wohingegen das Kronhorn der Katzenkralle stets unpigmentiert ist (FREWEIN u. WALLER-BERGER, 1994; ERNSBERGER, 1998).

## RÜCKENWULST

Der Rückenwulst ist eine Besonderheit der Fleischfresserkralle. Von außen ist er nicht zu erkennen, da das Rückenwulstepithel, gemeinsam mit dem Epithel des proximalen Teiles des Kronsegmentes eine oberflächlich glatte Krallenplatte bildet. SEIDEL (1992) spricht in diesem Fall von einer ausgleichenden Hornbildungsrate. Erst das „ausgeschuhte“ Präparat und damit die Freilegung der dermo-epidermalen Fläche der Hundekralle gibt Aufschluss über die Ausmaße des Rückenwulstes. SIEDAMGROTZKY (1870) sieht in dem Rückenwulst die Ausbildung einer großen, bindegewebigen Papille. Die Dermis des Rückenwulstes ist laut KRÖLLING (1960), TRAUTMANN (1949) sowie SEIDEL (1992) in diesem Bereich fest mit dem Periost des Krallenbeinfortsatzes verbunden, eine Subkutis existiert nach diesen Autoren nicht.

Der BINDEGEWEBIGE RÜCKENWULST stellt die schnabelförmige distale Fortsetzung des proximalen Abschnittes der Kronsegmentlederhaut auf dem Krallenrücken dar (SIEDAMGROTZKY, 1870; TRAUTMANN, 1949; KRÖLLING, 1960). Dabei entsteht dorsal an der dermo-epidermalen Grenzebene auf der „Schnabelspitze“ eine nach apikal ziehende dorsomediane flache konkave Rinne (SIEDAMGROTZKY, 1870). Diese Rinne wird beiderseits von abgerundeten Kämmen flankiert. Am Übergang zu den Seitenteilen der Kralle entsteht eine falzartige konkave Vertiefung. Diese grenzt den Rückenwulst von den Seitenflächen des Wandsegmentes ab. Sie setzt sich als flache Rinne bogenförmig nach proximopalmar in Richtung des Ballenhöckers (Tuberositas flexoria) des Krallenbeines fort (SEIDEL, 1992). Im Querschnitt hat der Rückenwulst eine pilzförmige Gestalt (SIEDAMGROTZKY, 1870).

Die Beschreibungen der bindegewebigen Anteile des Rückenwulstes sind in der Literatur nicht einheitlich und lassen daher keine eindeutige Unterscheidung zwischen Lederhaut und Unterhaut zu. Der Rückenwulst wird als bindegewebiger Teil über dem Rücken des Krallenbeinfortsatzes beschrieben. Dieser sitzt bei den Kaniden einer breiten Basis auf und wölbt sich dorsal zu einem starken Wulst empor (ZIETZSCHMANN, 1918; SIEDAMGROTZKY, 1870). Derjenige der Feliden ist im Gegensatz zu dem Rückenwulst des Hundes extrem schmal und hoch. Im Querschnitt setzt sich dieser knopfförmig, verbunden über einen schmalen bindegewebigen Steg von dem Rücken der Phalanx tertia ab (ERNSBERGER, 1998). GÜCKEL (1922) unterscheidet am bindegewebigen Rückenwulst der Fleischfresserkralle eine oberflächliche, aus lockerem Bindegewebe bestehende „Rückenwulstschicht“ und eine tiefere, aus einer kompakteren Bindegewebsschicht sich

zusammensetzende „Rückenwulstunterschicht“. ERNSBERGER (1998) unterteilt die obere lockere Bindegewebsschicht im Bereich des Rückenwulstes der foetalen Katzenkrallen noch einmal in eine subepitheliale, kompakte, faserreiche und eine zum Krallenbein hin sich anschließende dicke, aufgelockerte Bindegewebsschicht.

Der bindegewebige PAPILLARKÖRPER des Rückenwulstes weist proximal sagittal nebeneinander stehende, apikal gerichtete Mikroblättchen<sup>15</sup> auf. Diese differenzieren sich distal weiter zu deutlichen Blättchen aus (SEIDEL, 1992). Die Spitze des Rückenwulstes trägt eine Reihe hintereinanderstehender Zöttchen. Diese werden als Terminalzöttchen des Rückenwulstes bezeichnet (SEIDEL, 1992).

Die Vaskularisation des Rückenwulstes ist bisher nur im Bereich des Papillarkörpers detailliert beschrieben worden. Das subepitheliale Kapillarnetz, welches kandelaberartig auch den distalen Bereich des proximalen Kronsegmentes versorgt, setzt sich im Gebiet des Rückenwulstes distal fort. Dabei bilden die Kapillaren ein feines Gefäßnetz, welches innerhalb der längs ausgerichteten dermalen Blättchen proximodistal verläuft. Apikal endet das Gefäßnetz in weit ausgezogenen Schleifen innerhalb der Terminalzöttchen des Rückenwulstes (DOBLER, 1969).

Das EPITHEL des Rückenwulstes unterlagert und verstärkt das Horn des proximalen Teiles des Kronsegmentes. Gemeinsam mit diesem bildet das Horn des Rückenwulstes die Krallenplatte (SEIDEL, 1992; SIEDAMGROTZKY, 1870; BOAS, 1894; TRAUTMANN, 1921). Durch das Horn des Rückenwulstepithels wird die Krallenplatte während ihres proximodistalen Vorschubes dorsal stetig dicker, während die Seitenteile konstant gleich stark bleiben (SIEDAMGROTZKY, 1870; BOAS, 1994; SEIDEL, 1992). Es unterscheidet sich nicht von dem Epithel des proximalen Teil des Kronsegmentes (SEIDEL, 1992) und ist, wie dieses, durch eine hohe Hornbildungsrate und eine dicke Übergangszellschicht gekennzeichnet (SIEDAMGROTZKY, 1870; SEIDEL, 1992).

Ebenso wie die Epithelzellen des Kronsegmentes, werden auch die Epithelzellen des Rückenwulstes ständig nachgebildet und sukzessive durch nachfolgende Zellgenerationen an die epidermale Oberfläche geschoben. Dabei differenzieren sie sich unter Bildung einer bis zu fünf Zelllagen dicken Übergangsschicht zu Hornzellen aus. Während der Ausdifferenzierung zur Hornzellschicht wird jedoch kein Stratum granulosum gebildet. Im Abschnitt der

---

<sup>15</sup> Mikroblättchen ist ein Begriff, der von SEIDEL (1992) eingeführt wird. Es handelt sich im Gegensatz zu makroskopisch erkennbaren Blättchen um Mikroblättchen, die in entsprechend geformte Rinnen der Basalzellen vordringen und diese basal in epidermale Mikroblättchen gliedern. Dagegen werden epidermale Blättchen von vielen Epidermszellen gebildet (SEIDEL, 1992).

dermalen Blättchen liegen die Basal- und Parabasalzellen zwischen diesen Blättchen (SEIDEL, 1992). Das Stratum corneum ordnet sich konzentrisch geschichtet über dem pilzförmigen Lederhautwulst des Rückenteils der Kralle an (SIEDAMGROTZKY, 1870). Bei den Feliden ist der Rückenwulst viel mächtiger als bei den Kaniden. Dadurch erhält die Krallenplatte der Katze dorsal eine bedeutend ausgeprägtere Verstärkung als beim Hund.

Durch die sehr schmale Verbindung der Rückenwulstbasis zum Wandsegment erscheint die intensiv verhornende Epidermis bei der Katze im Querschnitt nahezu dreiviertelkreisförmig. Die ineinander geschichteten Hornzellen ermöglichen es der Katze, die äußeren Hornzellschichten der Krallentüte hülsenförmig abzustreifen. Diese besondere Eigenschaft ist der Hundekralle nicht gegeben (ERNSBERGER, 1998).

#### WANDSEGMENT

Das Wandsegment wird entweder in den unpaaren Rückenwulst und die paarigen proximalen und distalen Seitenabschnitte inklusive der apikalen Terminalmatrix (GÜCKEL, 1922; BUDRAS et al., 1991; SEIDEL, 1992) gegliedert oder nur in die paarigen Seitenabschnitte einschließlich des Terminalabschnittes der Kralle (BOAS, 1894; ZIETZSCHMANN, 1918; SIEDAMGROTZKY, 1870) eingeteilt. Die folgende Beschreibung der Form des Wandsegmentes gilt dem bindegewebigen (dermalen) Teil, welcher nach dem Ausschuhlen an der dermo-epidermalen Grenzfläche sichtbar wird. Der proximale Seitenabschnitt hat eine dreieckige Form. Dieser Teil grenzt dorsal an den Rückenwulst, proximal an das Kronsegment und distal an die flache Rinne des Übergangs zum distalen Seitenteil. Der distale Seitenabschnitt schließt sich krallenspitzenwärts an die proximale Seitenflächen an (SEIDEL, 1992). Der Terminalabschnitt liegt an der Krallenspitze distal des Rückenwulstes und ist meist leicht konvex gebogen.

Die folgende Beschreibung des Wandsegmentes beschränkt sich auf die lateralen und den terminalen Krallenabschnitt, der Rückenwulst wird in diesem Abschnitt ausgenommen.

Die DERMIS des Wandsegmentes ist seitlich untrennbar mit dem Periost des Krallenbeinfortsatzes verbunden (KÜNZEL, 1990; FREWEIN u. WALLER-BERGER, 1994). Ihr dicht gefügtes Bindegewebsnetz ist mit zahlreichen elastischen Fasern und Blutgefäßen durchsetzt. Dabei nimmt die Stärke der Bindegewebsschicht des lateralen Bereiches des Wandsegmentes deutlich von dorsal nach palmar ab (GÜCKEL, 1922). Das Wandsegment wird von Gefäßästen des Arcus terminalis versorgt, welche auch für die Vaskularisation innerhalb des distalen Teiles des proximalen Kronsegmentes und des Rückenwulstes verantwortlich sind

(BUDRAS, 1999). Eine genauere Beschreibung dieser Gefäßnetze innerhalb der Lederhaut des Wandsegmentes liegt nicht vor. Der oberflächliche dermale Gefäßplexus der Wandlederhaut bildet je nach Papillarkörperform unterschiedliche Gefäßformationen aus.

Proximal ist der PAPILLARKÖRPER des Wandsegmentes durch einen glatten Übergangstreifen vom Kronsegment getrennt, distal werden kleine Leisten ausgebildet. Diese spalten sich, im Gegensatz zu denen im Bereich des proximalen Teiles des Rückenwulstes, immer wieder auf, wodurch sie ein unregelmäßiges Erscheinungsbild zeigen (SEIDEL, 1992). Die Vaskularisation der dermalen Leisten des proximalen Seitenabschnittes des Wandsegmentes erfolgt als Fortsetzung des Gefäßnetzes des proximalen Rückenwulstabschnittes. Die im Rückenwulstbereich leuchterartig verzweigten Kapillarnetze innerhalb der dermalen Blättchen verlaufen im proximalen Seitenabschnitt des Wandsegmentes in kleinen Bögen oder Arkaden zur Oberfläche innerhalb der bindegewebigen Leisten von proximal nach distal (DOBLER, 1969).

Der Papillarkörper des distalen Seitenbereiches des Wandsegmentes stellt die Fortsetzung der proximalen Seitenflächen nach distal dar. Dabei differenzieren sich die anfänglich noch kleinen Leisten zu Blättchen aus. Diese bereits lichtmikroskopisch erkennbaren Blättchen sind parallel in proximodistaler Richtung bogenlinienförmig und damit der konvexen Krümmung der Kralle entsprechend angeordnet und nehmen allmählich in apikaler Richtung an Größe zu (SIEDAMGROTZKY, 1870; DOBLER, 1969; SEIDEL, 1992; BUDRAS u. SEIDEL, 1992; WILLE u. WILKENS, 1995). Die Höhe der distal gerichteten Blättchen nimmt dorsopalmar ab. Die Lederhautblättchen sind in der Nähe des Rückenwulstes am deutlichsten, im Bereich des Überganges zum Sohlensegment am undeutlichsten ausgeprägt (SEIDEL, 1992; BUDRAS u. SEIDEL, 1992). Die Vaskularisation dieser dermalen Wandsegmentblättchen erfolgt als distale Fortsetzung des subepithelialen Kapillarnetzes des proximalen Seitenabschnittes. Die Kapillaren ordnen sich in diesem Bereich in Form von sagittal stehenden Kapillarbögen innerhalb der längs ausgerichteten Blättchen an (DOBLER, 1969).

Die terminalen Zöttchen, welche an der Krallenspitze den Firsten der Lederhautblättchen entspringen (SEIDEL, 1992), beherbergen lang ausgezogene, in Lamellenform innerhalb einer einzelnen Zotte verlaufende Kapillarbögen. Vom höchsten Punkt der Kapillarbögen ausgehend, entspringt jeweils ein anastomosierendes Randgefäß, welches die einzelnen Kapillarbögen miteinander verbindet (DOBLER, 1969). Jede der apikal gerichteten Terminalpapillen enthält eine große unverzweigte Kapillarschleife (DOBLER, 1969).

Die Dermis des Wandsegmentes der Katzenkralle entspricht ungefähr dem Aufbau der Wandlederhaut der Hundekralle (SIEDAMGROTZKY, 1870).

Das EPITHEL des Wandsegmentes liegt auf der Basalmembran über dem Papillarkörper des Wandsegmentes. Entsprechend der Papillarkörperoberfläche bzw. in Interaktion mit dieser, bilden sich epitheliale Blättchen aus. Diese sind jedoch nur im Stratum germinativum und dort nach dem Ausschühen mit bloßem Auge auch nur in den distalen Bereichen gerade noch wahrnehmbar. Durch ein egalisierendes (ausgleichendes) Wachstum der Wandepidermis erscheint das Stratum corneum glatt. Im Wandsegment der Hundekralle sind keine Hornblättchen zu finden (SEIDEL, 1992; BUDRAS u. SEIDEL, 1992). Das Epithel der Seitenteile des Wandsegmentes nimmt an der Verdickung der Krallenplatte keinen Anteil (SIEDAMGROTZKY, 1870).

Das Epithel des Wandsegmentes bildet entsprechend dem Matrizen-Patrizen Prinzip mit der Dermis die dermo-epitheliale Grenzfläche. Somit entstehen an der proximalen Seitenfläche des Wandsegmentes kleine epitheliale Leistchen. Die Basalzellen stehen als dünne, spindelförmige Zellen auf der Basalmembran. Das Stratum spinosum umfasst in diesem Bereich zwei- bis drei Zelllagen und geht ohne eine Übergangsschicht in das Stratum corneum über. Die Hornzellen sind im Querschnitt oval. Die Basal- und Parabasalzellen des distalen Seitenteils bilden unterschiedlich dicke unverhornte epidermale Blättchen aus und sind als spindelförmige Zellen etwa doppelt so hoch wie über dem Rückenwulst und über den proximalen Seitenteilen des Wandsegmentes. An der Krallenbeinspitze sind diese Basalzellen teilweise sehr dicht angeordnet und nehmen eine schlanke Gestalt an. Das Stratum spinosum ist dem des proximalen Seitenteiles vergleichbar, ein Stratum granulosum kommt nur im terminalen Bereich des Wandsegmentes vor. Damit entsteht das Wandsegmenthorn mit Ausnahme des Terminalhornes nach dem Prinzip der harten Verhornung.

Das terminale Wandsegmenthorn ist locker und bröckelig, es steht palmar in Verbindung mit dem Sohlenhorn (SIEDAMGROTZKY, 1870)

Distal des Rückenwulstes an der Krallenspitze befindet sich die Terminalmatrix. Die Epidermis, welche sich dort über den dermalen Terminalzotten unter Bildung eines Stratum granulosum ausdifferenziert, bildet epidermale Hornröhrchen aus. Diese Hornröhrchen sind unpigmentiert. Das Terminalhorn füllt die Spitze der Krallentüte aus und ist von weicher und bröckeliger Konsistenz (SEIDEL, 1992).

Über die Pigmentierung der Epithelzellen des Wandsegmentes gibt es unterschiedliche Beobachtungen. Die Beschreibungen reichen von einer besonders zahlreichen Pigmentierung



in den inneren Hornschichten der proximalen und distalen Seitenflächen (SEIDEL, 1992), bis hin zu einer fast ganz unpigmentierten Epidermis des Wandsegmentes (SIEDAMGROTZKY, 1870).

Die Struktur der Epidermis des Wandsegmentes der Katzenkralle ähnelt derjenigen in der Hundekralle (SIEDAMGROTZKY, 1870).

#### WEIßE LINIE

BUDRAS und SEIDEL (1992) sind die ersten Autoren, die auch für die Hundekralle eine Weiße Linie (Zona alba) beschreiben. Diese Zona alba liegt zwischen dem Wandhorn und dem Sohlenhorn. Sie entsteht im glatten Übergangstreifen zwischen den noch keratinisierenden Zellen der Wandepidermis und der Sohlenepidermis, tritt jedoch erst ab dem distalen Drittel der Kralle in Erscheinung und wird apikal wieder undeutlicher. Durch die einfache Struktur des Krallenepithels besteht ein deutlicher Unterschied zu Huf und Klaue. Im Gegensatz zu den Zehenendorganen dieser beiden Spezies fehlt der Kralle die typische Blättchenkonfiguration des Wandhornes mit dem dazwischen liegenden terminalen Füllhorn, aus welchen die Zona alba an Huf und Klaue gebildet wird (BUDRAS, 1999). Über den dermalen Terminalzöttchen des Wandsegmentes der Hundekralle entsteht aus der epidermalen Matrix nur ein strukturloses Horn (SEIDEL, 1992). Die zentral anliegenden Hornmassen stellen ein Maß für die Hornbildungsrate im Wandsegment dar. Die peripher angrenzenden Hornmassen spiegeln die Hornbildung im Kronsegment wider. Sichtbar ist die Zona alba an der nicht ausgeschuhten Kralle jedoch nur bei deutlich pigmentierten Hundekralen (SEIDEL, 1992).

#### SOHLENSEGMENT

Das Sohlensegment bildet den distalen Abschluss des Zehenendorganes (DOBLER, 1969). Es liegt zwischen den freien Rändern der Krallenplatte und geht proximal des Ballenhöckers (Tuberositas flexoria) durch einen Übergangstreifen in den Zehenballen und distal sowie laterolateral in das Terminalhorn des Wandsegmentes über (SEIDEL, 1992; FREWEIN u. WALLER-BERGER, 1994).

Die LEDERHAUT des Sohlensegmentes steht in einem kontinuierlichen Zusammenhang mit der Lederhaut des Wandsegmentes. Proximal setzt sich die Dermis des Sohlensegmentes in die Dermis des Zehenballens fort. Die Sohlensegmentlederhaut steht in direkter Verbindung mit dem Periost der Krallenbeinsohlenfläche. Die Stärke der Lederhaut bleibt entweder von

proximal nach distal gleich (SIEDAMGROTZKY, 1870) oder nimmt spitzwärts zu (GÜCKEL, 1922).

Die Lederhaut des Sohlensegmentes enthält unregelmäßig verlaufende Bündel von kollagenen Fasern und ist darüber hinaus von zahlreichen elastischen Fasern durchsetzt. Aus der Lederhaut des Zehenballens strahlen bindegewebige Faserbündel teilweise in das Sohlensegment ein (GÜCKEL, 1922). Die Vaskularisation der Sohlenlederhaut erfolgt wiederum über Äste des Arcus terminalis, sowie aus Gefäßästen des subepidermalen Kapillarnetzes des terminalen Teiles des Wandsegmentes (DOBLER, 1969). Dabei bildet sich das subepidermale Gefäßnetz des Sohlensegmentes innerhalb des Papillarkörpers entsprechend der Papillarkörperform aus.

Die Lederhaut im Bereich des Sohlensegmentes bildet zahlreiche schmale und lange, dachziegelartig übereinander liegende Zotten aus, die unter Bildung eines spitzen Winkels distal gerichtet sind und stumpf enden (SIEDAMGROTZKY, 1870; DOBLER, 1969; BUDRAS u. SEIDEL, 1992). Apikal nimmt ihre Anzahl deutlich zu (DOBLER, 1969). Ab dem mittleren Sohlendrittel bis hin zum Sohlenteil der Krallenspitze sitzen alle Zotten krallenspitzenwärts ausgerichteten Leisten auf. Im proximalen Sohlenabschnitt ist dieses bei nur bei etwa der Hälfte aller Zotten rasterelektronenmikroskopisch sichtbar (SEIDEL, 1992). Die Kapillaren innerhalb der Sohlenlederhautzotten bilden einfache, lange Gefäßschleifen (DOBLER, 1969).

Die Sohlenlederhaut der Katzenkrallen ist in ihrer Ausdehnung geringer als in der Hundkrallen (GÜCKEL, 1922). Eine Besonderheit der Dermis der Sohle der Katze stellt die axolongitudinal ausgerichtete bindegewebige Sohlenfalte dar (ERNSBERGER, 1998). ERNSBERGER (1998) beschreibt im Sohlensegment der Krallen neonater Katze keinen zöttchenförmigen, sondern einen ausgeprägten blättchenförmigen Papillarkörper. In wie weit sich jedoch die Blättchen später noch zergliedern, geht aus ihrer Arbeit nicht hervor.

Zwischen der Dermis und der EPIDERMIS des Sohlensegmentes befindet sich eine deutliche Basalmembran. Dem aus kubischen Basalzellen bestehenden Stratum germinativum folgt ein Stratum spinosum. Diese Stachelzellschicht besteht proximal nur aus vier Zellschichten, verstärkt sich nach distal jedoch bis auf etwa zehn Zellschichten. Die Basal-, Parabasal- und Spinosazellen legen sich zwiebelschalenartig um die dermalen Zöttchen herum. Es bilden sich im unverhornten Bereich der Epidermis epidermale Hornröhrchen aus (SEIDEL, 1992). Durch ein ausgleichendes Wachstum der Epidermiszellen verschwinden die Röhrchenformen bis zur Oberfläche wieder, so dass der verhornte Bereich der Sohlenepidermis keine Röhrchenstruktur mehr aufweist (SEIDEL, 1992). Während nach SIEDAMGROTZKY

(1870), BOAS (1831) sowie TRAUTMANN und FIEBIGER (1949) solche epidermalen Röhrrchen nur schwach ausgebildet sind, beschreibt GÜCKEL (1922) gar keine epidermalen Röhrrchen im Bereich des Sohlensegmentes der Hundekralle.

Zwischen dem Stratum spinosum und dem Stratum corneum der Sohlenepidermis befindet sich ein ein- bis zweilagiges Stratum granulosum, welches sich ohne eine deutliche Übergangsschicht in das Stratum corneum weiter differenziert (SEIDEL, 1992). Die oberen Hornzelllagen (Stratum corneum) sind weich und bröckelig und haben eine unregelmäßige Schollenform. Diese lassen sich leicht von dem gummiartigen Röhrrchenhorn des Terminalbereiches unterscheiden. Beide Hornmassen (Horn des Sohlensegmentes und Terminalhorn des Wandsegmentes) stellen lockere Gebilde dar, die leicht aus der Horntüte herausfallen können. Das Sohlenhorn der Hundekralle kann entweder pigmentiert oder unpigmentiert sein (SIEDAMGROTZKY, 1870).

Für das Sohlensegment der Katzenkralle sind keine Hornröhrrchen beschrieben worden.

#### BALLENSEGMENT (ZEHENBALLEN, TORUS DIGITALIS)

Der Zehenballen liegt proximopalmar resp. -plantar des Sohlensegmentes. Er ist durch eine offene unbehaarte Grenzfurche vom Sohlensegment abgegrenzt (SIEDAMGROTZKY, 1870; TRAUTMANN, 1949; KRÖLLING u. GRAU, 1960; HABERMEHL, 1996). Nach der Definition von SEIDEL (1992) ist der Zehenballen zwar zum Zehenendorgan zu rechnen, darf aber nicht im Zusammenhang mit dem Begriff der Kralle „im weiteren Sinne“ verwendet werden. Der Zehenballen des Hundes ist demnach nicht mit dem Ballensegment homologer Zehenendorgane gleichzusetzen (s. a.: Kapitel 2.3: Spezielle Definition und Funktion der Zehenendorgane). Die folgende Beschreibung des Zehenballens bedient sich aber dennoch, ungeachtet der Bedenken von SEIDEL (1992), des Begriffes des Ballensegmentes als Synonym zum Begriff des Zehenballens.

Die DERMIS des Ballensegmentes besteht aus einem dicht gefügten Bindegewebe. Dieses ist besonders an der Grenze zur Subkutis mit zahlreichen elastischen Fasern durchsetzt. Radiär bis netzförmig angeordnete Haltebündel aus kollagenen und elastischen Fasern ziehen von der Lederhaut in die Unterhaut und befestigen den Ballen an Faszie und Skelett (BUDRAS, 1996). Innerhalb der Lederhaut des Zehenballens liegen zahlreiche Ausführungsgänge der ekkrinen Schweißdrüsen, deren Drüsenendstücke in der Subkutis liegen und über ihre Ausführungsgänge bis an die epidermale Oberfläche des Zehenballens ziehen (GÜCKEL,

1922; ZIETZSCHMANN, 1945). Apokrine Schweiß-, holokrine Talgdrüsen und Haare kommen im Zehenballen nicht vor (MULLER et al., 1993 a).

Der PAPILLARKÖRPER der Zehenballenlederhaut besteht aus starken, senkrecht zur Oberfläche stehenden, kegelförmigen Papillen (Papillae coriales tori digitalis). Straffe Bindegewebszüge strahlen in diese Papillen hinein (GÜCKEL, 1922; DOBLER, 1969; BUDRAS u. FRICKE, 1996).

Der Ballen wird über Gefäßäste (Rr. tori digitales) der palmaren bzw. plantaren Zehenarterien vaskularisiert (BUDRAS, 1999). Subepidermal bildet sich ein deutlich ausgeprägtes Gefäßnetz aus. Dabei ziehen dickere Gefäßstämmchen in die einzelne Papille hinein, wobei von diesem Gefäßstämmchen weitere Kapillaräste und Kapillarschlingen abzweigen. Zwischen den einzelnen Kapillarschlingen kann es wiederum zu Anastomosenbildungen kommen (GÜCKEL, 1922; DOBLER, 1969).

Eine Besonderheit am Katzenballen ist das Auftreten von Vater-Pacini-Lamellenkörperchen in der Leder- und Unterhaut ab dem dritten Lebensmonat (HABERMEHL, 1996). Diese wurden für den Zehenballen des Hundes bisher noch nicht beschrieben. Dabei handelt es sich um konzentrisch angeordnete Lamellen aus Fibrozyten, welche zentral einen Endkolben einer Nervenfasern einschließen. Sie werden bis zu 4 mm groß und sind daher schon mit bloßem Auge sichtbar.

Die EPIDERMIS des Zehenballens (Epidermis tori digitalis) nimmt ab dem Übergang vom Sohlensegment kontinuierlich an Dicke zu (GÜCKEL, 1922). Entsprechend der sehr dicht stehenden Lederhautpapillen bilden sich epidermale Leisten und Zapfen aus. Das ausgeprägte Stratum corneum differenziert sich unter Ausbildung eines Stratum granulosum und eines Stratum lucidum. Damit unterliegt das Epithel des Zehenballens dem Prinzip der weichen Verhornung (GÜCKEL, 1922; ZIETZSCHMANN, 1943). ZIETZSCHMANN (1943) beschreibt am Zehenballen des Hundes einen Primitivzustand von Röhrenbildung bei minimalen Massen an Zwischenröhrenhorn. Dies konnte bisher von anderen Autoren nicht bestätigt werden. Auffällig sind jedoch die makroskopisch gerade noch sichtbaren Poren, welche zwischen den Papillen liegen und die Mündungen der Ausführungsgänge der ekkrinen Drüsen darstellen (GÜCKEL, 1922; ZIETZSCHMANN, 1943).

Die sich auf der Ballenoberfläche des Hundes ausbildenden konischen Papillen fehlen bei der Katze (MEYER et al., 1990). Der Katzenballen beherbergt jedoch eine weitaus höhere Zahl an ekkrinen Drüsen als der Ballen des Hundes (KIRSTENSEN, 1976). Neueste Erkenntnisse zum Zehenballen der Katze zeigen, dass dieser erst mit einem halben Jahr seine definitive

spezies-spezifische Struktur annimmt. Wesentlich zu dieser Differenzierung tragen neben den genetischen Faktoren die funktionelle Belastung bei (KARMANN, 2001). Vergleichbare Erkenntnisse zur Entwicklung des Zehenballens des Hundes liegen nicht vor.

## **2.5 ALLGEMEINE ANMERKUNG ZUR ENTWICKLUNG DER HAUT UND HAUTGEFÄßE UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER PHALANGENENTWICKLUNG**

Die Entwicklung der Haut und ihrer Hautmodifikationen stellt ein komplexes System aus induktiven und inhibierenden Faktoren zwischen dem Ektoderm und dem subektodermalen Mesoderm dar (SENGEL, 1990; BYRNE et al., 2003).

Die EPIDERMIS der Haut entwickelt sich aus dem Ektoblasten sive Ektoderm, während die darunter liegenden BINDEGEWEBIGEN ANTEILE (Dermis und Subkutis) und die Gefäße aus dem Mesoblasten, dem Dermatome des Somiten, hervorgehen (MICHEL, 1983). Funktionell gesehen stellt die mesodermale (mesenchymale) Komponente den vorherrschenden Faktor in der Entwicklung der Haut und Hautmodifikationen dar. Dies gilt insofern, als dass das Mesenchym die überwiegende Kontrolle über Entwicklung der sich differenzierenden Haut und Hautmodifikationen übernimmt. Der ektodermalen Komponente ist es möglich, auf die induktiven Instruktionen der mesodermalen Komponente zu antworten. In diesen epidermal-mesenchymalen Interaktionen spielen die extrazelluläre Matrix und die Mikroarchitektur der dermo-epidermalen Grenzfläche eine wichtige Rolle (SENGEL, 1990).

### **2.5.1 ENTWICKLUNG DER EPIDERMIS UND BASALLAMINA**

Die aus dem EKTODERM hervorgehende Epidermisschicht wird zuerst von einer Schicht kubischer Zellen gebildet. Aus diesen Zellen differenzieren sich weitere Zellen, die sich in Form einer Zellschicht abgeplatteter Zellen über die kubischen Stammzellen legen. Die basale Zellschicht differenziert sich zur Keimschicht, die aus ihr gebildeten ersten abgeplatteten Tochterzellen zum primitiven PERIDERM (ZIETZSCHMANN u. KRÖLLING, 1955; MICHEL, 1983). Die anfangs noch strukturlose Basallamina (Lamina basalis) wird von den Epithelzellen gebildet (SENGEL, 1986, SMITH et al., 1988). Sie setzt sich aus einer Lamina rara seu lucida und einer Lamina densa zusammen (SMITH et al., 1988; LIEBICH, 1990). Bei etwas älteren Foeten (beim menschlichen Foetus ab der sechsten Woche der Schwangerschaft) wird von den mesenchymalen Anteilen der Haut eine Lamina fibroreticularis abgeschieden. Legt sich diese, aus Bindegewebsgrundsubstanzen gebildete Schicht (LEONHARDT, 1990) an die Basallamina, so bilden Lamina rara, Lamina densa und

Lamina fibroreticularis in ihrer Gesamtheit die Basalmembran (LIEBICH, 1990). Dieser Prozess vollendet sich beim menschlichen Foetus etwa am Ende des ersten Schwangerschaftsdrittels (SMITH et al., 1988).

In der weiteren Entwicklung bilden sich, ausgehend von der epidermalen Keimschicht, neue Lagen polygonaler Zellen aus, die daraufhin zwischen der Keimschicht und dem primitiven Periderm zu finden sind. Diese Zellen werden als Intermediärlagen bezeichnet. Durch ihre Entstehung wird aus dem zweischichtigen PLATTENEPITHEL ein mehrschichtiges Epithel (MICHEL, 1972). Das Epithel besteht damit in der Tiefe aus protoplasmatischen Zellen, aus denen sich oberflächenwärts gewebespezifisch ausdifferenzierende Zellen bilden. Diese flachen oberflächenwärts immer mehr ab und repräsentieren mit ihrer zur freien Oberfläche hin zeigenden Lage die Peridermzellen im weiteren Sinne (ZIETZSCHMANN u. KRÖLLING, 1955).

Das Periderm stellt eine besondere epitheliale Schutzschicht im Embryo bzw. Foetus dar. Es gehört nicht zur eigentlichen Epidermis, da dieser Begriff für ein mehrschichtiges verhorntes Plattenepithel vorbehalten ist. Das Periderm hingegen besteht aus noch kernhaltigen, unverhornten und damit lebenden Epithelzellen (BRAGULLA, 1998). Die Peridermzellen bauen eine Schutzbarriere gegenüber der Amnionflüssigkeit auf. Entsprechend dieser Funktion des Epithels (BAZZONI u. DEJANA, 2002) haben sich auch im Bereich des Periderm die Interzellularverbindungen funktionsabhängig ausgebildet. MORITA (2002) spricht in diesem Fall von peridermspezifischen tight junctions.

Während das Periderm Richtung Oberfläche abflacht und sich nach der Ausbildung eines Stratum corneum ablöst, bildet sich aus der basalen Keimschicht die embryonale und foetale Epidermis des Integumentum commune. Diese Epithelzellen synthetisieren im Laufe der Entwicklung gewebespezifische und für die weitere Differenzierung des Epithels wichtige Keratine (O'GUIN et al., 1987; BRAGULLA, 1996). Diese Keratine sind charakteristisch für bestimmte Entwicklungsstadien, weshalb es spezifische „Keratinmuster“ für die Epidermis von Embryonen, Foeten, Neugeborene, Juvenile und Adulte gibt (DALE u. HOLBROOK, 1987). Mit der Bildung der Keratine kommt es auch zum Auftreten von Keratohyalin granula in der foetalen Epidermis (BRAGULLA, 1996). Das Vorkommen von Keratohyalin granula in der sich differenzierenden Epidermis ist von ihrem Entwicklungsstadium abhängig. So werden „foetale“ oder „unreife“ Keratohyalin granula produziert, die sich durch ihre Ultrastruktur von den reifen Keratohyalin granula unterscheiden (BREATHNACH, 1981; HAYWARD u. KENT, 1981). Auch im Verlaufe der foetalen Entwicklung von

Hautmodifikationen entstehen charakteristische Keratohyalin granula in der Epidermis. So erwähnen BRAGULLA et al. (1994) bzw. BRAGULLA (1996) für die Entwicklung der Rinderklaue und des Pferdehufes in allen Segmenten der zweiten Epidermisgeneration ein Stratum granulosum, während die dritte Epidermiszellgeneration nur segmentspezifisch Keratohyalin granula ausbildet. Die eigentliche Verhornung beginnt erst im letzten Drittel der foetalen Entwicklung (MICHEL, 1983).

Das Periderm ist neben den spezifischen Zell-zu-Zell-Verbindungen durch das Vorhandensein charakteristischer Keratinproteine und Keratohyalin granula gekennzeichnet. Diese Faktoren sowie das Fehlen eines marginalen Bandes ermöglichen eine leichte Differenzierung zwischen den Epidermiszellen von dem darüber liegenden Periderm. Nach Ausbildung eines Stratum corneum lösen sich die Peridermzellen von ihrer Unterfläche ab (BRAGULLA, 1996).

Die Pigmentbildung setzt relativ früh während der Foetalentwicklung ein (SINOWATZ, 1991). Dabei wandern aus der Neuralleiste Melanoblasten in die Epidermis ein und geben mittels ihrer zytoplasmatischen Fortsätze das von ihnen aus Tyrosin gebildete Melanin an die Epidermiszellen ab (SINOWATZ, 1991).

### **2.5.2 ENTWICKLUNG DER BINDEGEWEBIGEN ANTEILE DER HAUT UND DER GEFÄßE**

Zu den bindegewebigen Anteilen der Haut zählt neben der Lederhaut auch die Unterhaut. Lederhaut, Unterhaut sowie die sich in diesen Gewebeschichten befindlichen Gefäße stammen je nach Körperregion aus unterschiedlichen Bereichen des MESODERMS (CHRIST u. WACHTLER, 1998).

Die Entwicklung des intraembryonalen Blutgefäßsystems ist ein höchst komplexes System, welches sich unter der Beteiligung verschiedener Mechanismen entwickelt (PLENDL et al. 2002). Der gesamte Prozess der Gefäßbildung besteht aus drei Teilprozessen, der Vaskulogenese, der Angiogenese und der Intussuszeption, wobei vermutlich bei der Entwicklung der Gliedmaßen die Angiogenese sowie die Intussuszeption eine entscheidende Rolle spielen (PLENDL et al., 2002). Mit der weiteren Entwicklung des Organes passt sich auch die Angioarchitektur und die Ausprägung der einzelnen Mikrozirkulationsabschnitte der Funktion an (Angioadaptation). Dadurch kommt es auch postnatal in der Angioarchitektur der Endstrombahn zu entsprechenden anpassenden Veränderungen (HIRSCHBERG u. PLENDL [zum Druck: 2005]).

Die Subkutis ist der weitgehend unspezialisierte bzw. weniger differenzierte Teil des Mesenchym. Eine Unterscheidung beider Gewebsschichten ist nur aufgrund des Faser- und Zellgehaltes möglich (siehe dazu: Diskussion). In der ersten Entwicklungsphase bestehen die Leder- und Unterhaut überwiegend aus Mesenchymzellen. Die Gefäßentwicklung beginnt in dem noch weitgehend undifferenzierten Bindegewebe, welches sich später zur Unter- und Lederhaut weiter ausdifferenziert. Aus diesen ersten Gefäßen bilden sich weitere Gefäßäste, welche an der dermo-subkutanen Grenze den tiefen dermalen Gefäßplexus formen (HABERMEHL, 1996).

Die PRIMÄRE DERMIS entwickelt sich aus einem zellreichen embryonalen mesenchymalen Bindegewebe, welches sich mit zunehmendem Alter zu einem fibrösen Netzwerk mit spärlich besetzten Zellen differenziert. In ihrer ersten Entwicklungsphase besteht die Lederhaut überwiegend aus MESENCHYMZELLEN. Synthetisiert von diesen Bindegewebszellen verteilen sich die feinen Kollagenfibrillen netzartig zwischen die Mesenchymzellen. Mit zunehmendem foetalen Alter steigt die Masse an geformter und ungeformter extrazellulärer Matrix an und füllt den extrazellulären Raum immer mehr aus. Die Kollagenfibrillen vereinigen sich zu Kollagenbündeln. Ab der fünfzehnten Woche ist in der Dermis des menschlichen Embryos erstmals eine Differenzierung zwischen einer superfizialen (papillären) und einer tiefen (retikulären) Region zu registrieren. Längere Kollagenfibrillenbündel, verbunden mit einer dichteren Ansammlung von Grundsubstanzen und einem geringeren Zellgehalt unterscheiden das tiefer liegende Stratum profundum (Stratum reticulare) vom zellreicheren, mit feineren Fasern durchzogenen Stratum superficiale (Stratum papillare). Dieses ordnet sich unterhalb der Epidermis an (SMITH et al., 1986). Im Stratum superficiale der sich entwickelnden Lederhaut erzeugen die Mesenchymzellen ein aus Kollagenfibrillenbündeln bestehendes Netzwerk, welches sich an der dermo-epidermalen Grenze anordnet. Dieses Kollagenfibrillennetzwerk (spätere Lamina fibroreticularis) bleibt während der ganzen embryonalen und foetalen Entwicklung bestehen und umhüllt (umscheidet) somit auch die sich später tief in die Dermis hinein entwickelnden epidermalen Anhänge. Ein vergleichbares Netzwerk aus vorwiegend retikulären Fasern schließt die sich entwickelnden Gefäße ein (SMITH u. HOLBROOK, 1982). Studien haben ergeben, dass ein Unterschied im Kollagenfasertyp während der fetalen Entwicklung der Haut und im adulten Stadium der Haut besteht. Der höhere Gehalt an Kollagen Typ III und V in der embryonalen Haut reflektiert das Verhältnis zwischen gefäß- und nervassoziertem Kollagen im Gegensatz zum dermalen Kollagen Typ I (SMITH et al., 1986). Damit wird auch der Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Dermis und der Blutgefäßentwicklung unterstrichen.



Im fortgeschrittenen Embryonalstadium haben sich die epidermalen Anhänge tief in die Dermis ausgebreitet. Das in der Dermis entstandene Stratum superficiale und Stratum profundum lässt sich nun nicht mehr nur aufgrund des unterschiedlichen Fasergehaltes, sondern auch durch die sich im Laufe der Entwicklung ausgebildeten Gefäßnetze differenzieren. Das oberflächlichere Stratum der Lederhaut setzt sich aus einem feinen fibrillären Netzwerk zusammen. Es bilden sich mehr oder weniger große Papillen aus. Das tiefe Stratum profundum ist durch ein dicht verzweigtes (später scherengitterartiges) Netz aus Kollagenfibrillenbündel gekennzeichnet. Ein Gefäßplexus (Rete arteriosum et venosum dermidis seu profundum) separiert die Dermis von der Subkutis (SMITH u. HOLBROOK, 1982; YEN u. BRAVERMANN, 1976; BRAVERMANN, 2000). Von diesem gehen Gefäße in den oberflächlichen Gefäßplexus (Rete arteriosum et venosum subpapillare seu superficialis) ab. Dieser liegt wiederum an der Grenzebene zwischen dem papillären und dem retikulären Stratum. Vom subpapillären Gefäßplexus treten senkrecht zur Netzebene subepitheliale Kapillarschlingen in den Papillarkörper und die Papillen hinein (LÖFFLER, 1966; YEN u. BRAVERMANN, 1976; BRAVERMANN, 2000). Diese subepithelialen Gefäße sind für die Ausdifferenzierung des spezifischen Papillarkörpers entscheidend. Die Interaktion zwischen der Matrix der Dermis, den subpapillären Gefäßen und dem direkt darüber liegendem Epithel sind ausschlaggebende Faktoren für die Ausformung des Papillarkörpers (BRAGULLA, 1996; PLENDL et al., 2002).

Während sich innerhalb der Lederhaut neben der Ausbildung spezifischer Gefäßplexus eine besondere Struktur des Bindegewebes entwickelt hat, bleibt die Unterhaut häufig weitaus unspezialisierter. Eine Besonderheit der Unterhaut ist die Fähigkeit, Fettzellen (Steatoblasten, Steatozyten) auszubilden. Hierfür lösen sich einige Mesenchymzellen aus ihrem Zellverband und speichern unter Einziehung ihrer Fortsätze tröpfchenweise Fett. Die Anordnung dieser Steatoblasten kann sowohl diffus als auch geballt auftreten. Je nachdem, ob in den Steatoblasten diffuse kleine Fetttröpfchen anzutreffen sind oder diese Tröpfchen zu einem einheitlichen großen Fetttropfen zusammengeflossen sind, spricht man von plurivakuolären Fettzellen oder univakuolären Fettzellen (MICHEL, 1983). Das eher locker strukturierte Gewebe der Unterhaut bildet sich je nach mechanischer Belastung unterschiedlich aus. Es dient später als Fettpolster, Verschiebeschicht, bzw. Verbindungsschicht für die Haut mit den darunter liegenden Faszien oder Muskeln und als „Verteilerschicht“ von Gefäßen und Nerven (LIEBICH, 1990)

### 2.5.3 DIE ENTWICKLUNG DER PHALANGEN (ZEHEN)

Die Phalangen entwickelt sich aus der EXTREMITÄTENLEISTE. Dies sind mesenchymale Wucherungen der mesodermalen Seitenzone, welche von einem Epidermisblatt überzogen werden. Vermehrtes Wachstum führt zur Entwicklung der Extremitätenhöcker und darauf folgend zu den Extremitätenstummeln. Die Ausbildung der Extremitäten innerhalb des undifferenzierten embryonalen Bindegewebes beginnt mit der Kondensation von Mesenchymzellen („polarizing region“). Diese „polarizing region“ ist sowohl verantwortlich für die Ausbildung des knöchernen Skelettes und der die einzelnen Skelettelemente verbindenden Gelenke, als auch für die Entwicklung der Anzahl der Zehen. Grundsätzlich beinhaltet diese Region erst einmal die Information für die Anlage aller Zehen. Eine Reduktion, sofern erforderlich, erfolgt erst später (SANZ-EZQUERRO u. TICKLE, 2003). Nach Ausbildung der Hand- bzw. Fußplatten zeichnen sich Finger- bzw. Zehenstrahlen ab. Die Strahlen bleiben vorübergehend durch eine Interdigitalmembranen verbunden (SCHNORR, 1989). Der freie Rand der Hand- bzw. Fußplatten wird von einem Epithel überzogen. Dies stammt aus dem Epidermisblatt des Ektoderm (Hautektoderm) und wird zuerst von einer Schicht kubischer Zellen gebildet. Die Ausdifferenzierung der Basallamina erfolgt entsprechend der allgemeinen Beschreibung der Entwicklung der Epidermis und Basallamina (s. a.: 2.5.1 Entwicklung der Epidermis und Basallamina).

In der weiteren Entwicklung der Zehen verdickt sich das Epithel apikal gegenüber dem übrigen, die Gliedmaßenanlage überziehenden Epithel zur sogenannten Randleiste (apical ectodermal ridge, AER). Die Interaktion dieser AER mit dem darunter liegenden Mesenchym trägt wesentlich zum Extremitätenwachstum bei (SANZ-EZQUERRO u. TICKLE, 2003).

Für die weitere Entwicklung des Extremitätenskelettes kommt es nach einer anfänglichen Verdichtung von Mesenchymzellen zu deren weiteren Differenzierung. Dabei tritt eine Umwandlung der Mesenchymzellen zu Knorpelzellen auf, die das PRIMORDIALSKELETT aufbauen.

Initial lassen sich noch keine Gelenke und Gelenkspalten ausmachen. In der weiteren Entwicklung entsteht eine „Interzone“ zwischen den Anlagen benachbarter Skelettelemente. Diese ist eine Region mit einer höheren Zelldichte (SANZ-EZQUERRO u. TICKLE, 2003). Aus dieser Interzone formt sich im Weiteren das echte, spalthaltige Gelenk inklusive der Gelenkhöhle und der Gelenkkapsel. Aus dem knorpeligen Primordialskelett entsteht durch eine peri- und enchondrale Ossifikation das knöcherne Skelett. Mit der Entwicklung des knorpeligen und knöchernen Skeletts beginnt auch die Separation der einzelnen Zehen durch

Apoptose der Zellen in den zwischen den Fingern resp. Zehen liegenden Geweben. Der genaue Mechanismus ist dabei noch nicht bekannt. Es wird eine Interaktion zwischen chondrogenetischen und apoptotischen Faktoren vermutet (SANZ-EZQUERRO u. TICKLE, 2003).

Die folgende Weiterentwicklung des Krallenbeines erfolgt, im Gegensatz zur Entwicklung der Phalanx media und Phalanx proximalis, in distoproximaler Richtung und nicht von der Mitte her, wie es für Röhrenknochen typisch ist (SCHAEFFER, 1934; ERNSBERGER, 1998). Im Gegensatz zum Nestflüchter (z. B. dem Pferd) ist das Krallenbein des Nesthockers zum Zeitpunkt der Geburt noch nicht vollständig verknöchert und differenziert sich erst postnatal vollständig aus. So ist beim Hund erst mit einem Alter von 255 Tagen die knöcherne Krallenleiste (Crista unguicularis) zu erkennen (SCHAEFFER, 1934).

## **2.6 DIE EMBRYONALE ENTWICKLUNG HOMOLOGER ZEHENENDORGANE**

Die Beschreibung der embryonalen Entwicklung homologer Zehenendorgane soll nur einen kurzen Überblick auf die wichtigsten Prozesse während der embryonalen, foetalen und perinatalen Entwicklung des entsprechenden Zehenendorganes geben und ist keinesfalls eine detaillierte Ausführung einzelner Abläufe.

### **2.6.1 DIE EMBRYONALE ENTWICKLUNG DER HUNDEKRALLE**

Spezielle Untersuchungen über die embryonale, fetale und perinatale Entwicklung der Hundekralle sind bisher noch nicht durchgeführt worden. SEIDEL (1992) vermutet eine leistenförmige Lederhautkonfiguration als die ursprüngliche Papillarkörperstruktur während der Entwicklung der Hundekralle. Das Vorkommen von primären Lederhautleistchen als ursprüngliche Lederhautkonfiguration kann BRAGULLA (1996) auch für die Entwicklung des Pferdehufes bestätigen.

### **2.6.2 DIE EMBRYONALE ENTWICKLUNG DER KATZENKRALLE**

Untersuchungen über die embryonale Entwicklung der Katzenkralle sind von KATO (1977) und von ERNSBERGER (1998) veröffentlicht worden. Dabei beschränkt sich die Arbeit von KATO (1977) vorwiegend auf die Entwicklung der Epidermis, während der Autor die Entwicklung von Dermis, Subkutis und Krallenbein vernachlässigt. KATO (1977) teilt die

Entwicklung der Katzenkralle in SECHS STADIEN ein. Seine Studien der Kralle am Katzenfoetus beginnen mit einer Kopf-Rumpf-Länge von 13 mm und enden bei einer Kopf-Rumpf-Länge von 116 mm. Im Gegensatz dazu untergliedert ERNSBERGER (1998) die Katzenkrallenentwicklung in VIER ABSCHNITTE. Dabei bezieht sich die Autorin hauptsächlich auf die Ausformung segmentspezifischer Strukturen. ERNSBERGER (1998) beschreibt in ihrer Arbeit die Krallen von Katzenfoeten und Katzenwelpen mit einer Scheitel-Steiss-Länge zwischen 40 mm und 160 mm.

Zu Beginn der Entwicklung der Katzenkralle kommt es im Zusammenhang mit der Ausbildung der Krallenform an der Gliedmaßenspitze (ERNSBERGER, 1998) im dorsodistalen Bereich der Zehenspitze zu einer Epithelverdickung (KATO, 1977). Diese Epithelverdickung nennt KATO (1977) gemeinsam mit einer im palmaren Bereich auftretenden Epithelverdickung „epidermal thickening of the level of the distal phalanges (ETD)“. Dabei bildet nur der dorsale Teil dieser plattenförmigen „ETD“, das auch als „primäres Nagelfeld“ bezeichnet wird, die Anlage der Kralle aus (KATO, 1977). Mit dem Erreichen einer Kopf-Rumpf-Länge des Katzenfoetus von 16 mm spricht KATO (1977) davon, dass die Anlage der Kronepidermis in Form einer epithelialen Einsenkung in die Lederhaut stattfindet. Diese breitet sich als „proximale Nagelgrube“ proximal und seitlich weiter aus und wird lateral vom „Nagelwall“ überragt. Das Epithel setzt sich in dieser Entwicklungsperiode aus drei Schichten zusammen, einer Keimschicht, einem Stratum intermedium und dem Periderm. Über der Krallenspitze des Katzenembryos beschreibt KATO (1977) die Ausbildung einer terminalen Epithelverdickung („epidermal thickening of the tip“, ETT). Dieser Bereich wird später zur terminalen Matrix der Katzenkralle. Im weiteren Verlauf der Entwicklung der Katzenkralle kommt es zu einer Verdickung der Zellen im Stratum intermedium, da in den oberen Zellen des Stratum intermedium Keratohyalin granula auftreten. Als dritten Abschnitt der Krallenentwicklung beschreibt KATO (1977) eine weitere Verdickung der Epidermis mit ersten Anzeichen einer Keratinisierung und späteren Verhornung. Diese tritt zuerst über der terminalen Matrix auf und breitet sich bis zum Proximalende der Kralle aus. Keratohyalin granula sieht der Autor in diesen Abschnitten der Epidermis nicht mehr.

Mit einer Kopf-Rumpf-Länge von 33 mm kommt es in der foetalen Katzenkralle zu einer schrittweisen Ablösung des Stratum corneum. Die Phase der Entwicklung der unteren Zelllagen beschreibt KATO (1977) als eine Art „Vorverhornung“. Sie bilden das Stratum tectorium, auch als den „primären oder falschen Nagel“ (entspricht wohl der hinfalligen Krallenkapsel) bezeichnet. Die Entwicklung des Stratum corneum erfolgt an der Katzenkralle

über der basalen Matrix nach proximal, bis mit einer Kopf-Rumpf-Länge von 115 mm eine vollständige Krallenwurzel ausgebildet ist. Gleichzeitig kommt es zur Differenzierung eines Stratum corneum im Bereich der terminalen Matrix. Proximale und terminale Matrix bilden zusammen die erste Krallentüte. Dabei stammen die dorsalen Hornzellen von der proximalen und die unteren Hornzelllagen von der terminalen Matrix. Wenn das Stratum corneum an der Kralle eines Katzenfoetus eine vollständige Krallentüte bildet, ist das Stratum tectorium, die „primäre oder falsche Krallentüte“, größtenteils abgelöst (KATO, 1977). Ab 80 mm Kopf-Rumpf-Länge entstehen in der Kralle, ausgehend von der terminalen Matrix, Basalzelleisten. Damit beginnt die Ausformung eines Papillarkörpers.

Nach ERNSBERGER (1998) lässt sich die Entwicklung der Katzenkralle in vier Abschnitte gliedern. Dabei bildet sich zuerst die Krallenform an der Gliedmaßenspitze aus. Eine deutliche Rinne trennt die Kralle von dem proximal liegenden Integumentum commune.

Als nächster Schritt differenziert sich zwischen dem 42. und dem 49. Trächtigkeitstag (SSL 75 - 104 mm) die Lederhaut im Bereich der Zehenspitze soweit aus, dass sich alle Segmente (außer dem Saumsegment) der Kralle und der Rückenwulst erkennen lassen. In der dritten Phase der Katzenkrallenentwicklung, zwischen einer SSL von 109 mm (51. Trächtigkeitstag) und einer SSL von 145 mm (61. Trächtigkeitstag), kommt es zur Ausbildung des Saumsegmentes. Das letzte Stadium umfasst die weitere Ausdifferenzierung der einzelnen Krallensegmente. Die Kralle nimmt an Größe zu. Da die Katze ein Nesthocker ist, ist die Kralle mit der Geburt des Welpen noch lange nicht ausdifferenziert. Das Krallenbein ist mit der Geburt noch nicht vollständig verknöchert, die knöcherne Krallenleiste hat sich noch nicht ausgebildet und der Papillarkörper ist in den einzelnen Segmenten noch nicht vollständig entwickelt.

Ähnlich wie an anderen Zehenendorganen beschreibt ERNSBERGER (1998) das Auftreten einer hinfalligen Krallenkapsel, der „primäre oder falsche Nagel“ (KATO, 1977). Diese wird ab dem zweiten Entwicklungsabschnitt von der Sohlenepidermis, ab dem dritten Abschnitt von der terminalen Wandepidermis gebildet. Da die hinfallige Krallenkapsel nicht, wie an anderen Zehenendorganen, von allen Segmenten gebildet wird, bezeichnet ERNSBERGER (1998) diese auch als „unvollständige“ hinfallige Krallenkapsel. Die Zellen der hinfalligen Krallenkapsel sind zwar tot, sie sind jedoch nicht als Hornzellen zu bezeichnen, da ihnen während ihrer Differenzierung die entscheidenden Schritte für die Ausbildung einer Hornzelle fehlen: (Umfließen der Zytokeratine durch intermediärfilamentassoziierte Proteine und deren Interaktion durch Disulfidbrücken). Der Zelltod erfolgt hier bereits im Stratum granulosum.

Eine Besonderheit der Hornzellen des terminalen Wandsegmentes der foetalen Katzenkrallen beschreibt ERNSBERGER (1998) bezüglich der Ausbildung ihrer Form des Zellverbandes. Die Zellen legen sich in Gestalt eines Überzuges als dünne Schicht abgeplatteter Zellen über die hinfalligen Zellmassen und umgeben somit als dünne Hornzellschicht die hinfallige Krallenkapsel.

Im Gegensatz zu KATO (1977) treten nach ERNSBERGER (1998) Keratohyalin granula im Zuge der Entwicklung der Krallenepidermis nicht in allen Segmentabschnitten während einer bestimmten Phase der Entwicklung in der Krallenepidermis auf.

### **2.6.3 DIE EMBRYONALE ENTWICKLUNG DER WIEDERKÄUERKLAUE AM BEISPIEL DER RINDERKLAUE**

KUNSIEN (1882) unterteilt die praenatale Entwicklung der Rinderklaue in drei Perioden. Dabei kommt es IN DER ERSTEN PHASE zur Ausbildung der Klauenform an der rundlichen Extremitätenspitze. Erstmals lassen sich eine Klauenwand von einer Klauensohle trennen. In der weiteren Entwicklung dieser Periode bilden sich mächtige Epithelmassen im Bereich der Klauenkrone aus. Diese bestehen aus einem Stratum basale, einem Stratum spinosum, einem Stratum lucidum und einem Stratum corneum.

Die ZWEITE ENTWICKLUNGSPERIODE ist charakterisiert durch die Ausdifferenzierung des Saumes und des Ballens, sowie durch die Ausbildung der Anlagen von Wandblättchen und Sohlenpapillen. Diese Sohlenpapillen treten erstmals an der Klauenspitze auf. Ihre Entwicklung schreitet vom Sohlenrand nach proximal bis zur Klauensohlenmitte fort. Die Blättchen der Klauenwand entstehen zuerst im lateralen Wandbereich und setzen sich weiter nach dorsal auf den Zehenrückenbereich fort. Dabei bleibt immer eine Grenze zwischen Klauenkrone und Klauenwand bestehen. Die Kronpapillen und Saumpapillen entwickeln sich im Anschluss an die Entwicklung der Sohlenpapillen.

Das Epithel beschreibt KUNSIEN (1882) in dieser Entwicklungsperiode als ein zuerst aus polygonalen, dann aus abgeflachten Zellen bestehendes mehrschichtiges unverhorntes Epithel. Die abgeflachten Zellen treten zuerst im Sohlenbereich auf und erscheinen etwas später auch in der Klauenwand. Den Epithelzellen der zweiten Generation ist allen das Auftreten eines Stratum granulosum gemein.

In der DRITTEN ENTWICKLUNGSPERIODE tritt die erste Verhornung der Epithelzellen ein. Diese beginnt im distalen, peripapillären Bereich der Klauenkrone am Übergang zur Klauenwand

und schreitet nach distal und palmar sive plantar fort. Später tritt die Verhornung der inter- und zuletzt der suprapapillären Kronepidermis ein. Dabei sind die Epithelröhrchen, welche über Krone und Sohle gebildet werden, zuerst nicht verhornt. Erst mit der anschließenden Verhornung erreicht die Klaue ihre typische Form.

BRAGULLA et al. (1997) beschreiben in allen Segmenten der foetalen Klauenepidermis ein Stratum granulosum. Dieses tritt segmentspezifisch zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Entwicklung der Rinderklaue vorübergehend auf.

Die Klaue eines neugeborenen Rindes wird im Bereich der Sohlenfläche und an den distalen Seitenrändern von einer weich-elastischen Zellmasse bedeckt (DIRKS, 1985; BRAGULLA et al., 1997). Diese Zellmassen stellen die hinfällige Klauenkapsel dar. Sie werden von den Epithelzellen der zweiten Epidermisgeneration aller Segmente gebildet (BRAGULLA et al., 1997).

#### **2.6.4 DIE EMBRYONALE ENTWICKLUNG DES PFERDEHUFES**

Die Entwicklung des Pferdehufes wird entweder in drei (BRAGULLA, 1996) oder in vier Perioden (ZIETZSCHMANN u. KRÖLLING, 1955) eingeteilt. Da die Beschreibung der Hufentwicklung von BRAGULLA (1996) die aktuellere ist, soll nur diese hier kurz beschrieben werden. Der Autor betrachtet die Entwicklung des Hufes unter dem Hauptmorphologiekriterium der Entstehung des segmentspezifischen Papillarkörpers. Dadurch lässt sich nach BRAGULLA (1996) eine Phase vor der Entwicklung des segmentspezifischen Papillarkörpers, eine Phase während der Entwicklung des segmentspezifischen Papillarkörpers und eine Phase nach der Entwicklung des segmentspezifischen Papillarkörpers unterscheiden. Die ERSTE PERIODE umfasst Hufe von Foeten im ersten Drittel der Embryonalentwicklung bis zum dritten Trächtigkeitsmonat. Der foetale Pferdehuf erhält in dieser Phase schon die für den adulten Pferdehuf charakteristische Form, der Papillarkörper, die später dreidimensionale Lederhautoberfläche ist dabei noch glatt. Zwischen dem mesenchymalen Bindegewebe von Subkutis und Dermis bildet sich ein weitlumiges Gefäßnetz aus, welches beide Schichten schon in diesem Entwicklungsstadium trennt. Neben der Ausbildung von Dermis und Subkutis kommt es zur Entwicklung der „ersten Epidermisgeneration“. Diese besteht aus einem Stratum basale, einem aus mehreren Zellschichten bestehenden Stratum intermedium und einem Stratum corneum und ist an den verschiedenen Hufbereichen schon unterschiedlich stark ausgeprägt. Über der „ersten Epidermisgeneration“ liegt noch das unverhornte, einschichtige Periderm.

In der ZWEITEN PHASE der Hufentwicklung steht die Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers im Vordergrund. Dieser Entwicklungsabschnitt umfasst die foetale Entwicklung des Pferdehufes im zweiten Drittel der Trächtigkeit vom zirka vierten bis sechsten Monat. Dabei kommt es durch die lokale Proliferation von Basalzellen zur Verformung der Dermisoberfläche (appositionelle Phase) mit anschließender gleichzeitiger Proliferation von Epidermis und Bindegewebe (intussuszeptionelle Phase). Beide Phasen (appositionelle Phase und intussuszeptionelle Phase) zusammen führen zur Ausbildung des segmentspezifischen Papillarkörpers. Es kommt zur ersten Ausbildung von Lederhautleisten am Zehenrückenteil im Bereich des Überganges zwischen Hufkrone und Hufwand. Fast zeitgleich entwickeln sich am Übergang von Hufwand zur Hufsohle separat weitere Lederhautleistchen aus. Diese, später als Randleisten bezeichneten Leisten, differenzieren sich sehr schnell weiter und bilden sogenannte Terminalpapillen aus. Mit zunehmender Entwicklung des Pferdehufes entstehen in allen Segmenten mehr oder weniger stark ausgeprägte Lederhautleisten. Diese werden, mit Ausnahme des Wandsegmentes, weiter zu Lederhautpapillen zergliedert. Am Wandsegment entwickeln sich die für das Wandsegment typischen primären und sekundären Lederhautblättchen. Auf den Firsten von primären Lederhautblättchen des Wandsegmentes entstehen sogenannte Kappenpapillen.

Neben der Entwicklung des Papillarkörpers kommt es an der Epidermis zur Ausbildung der zweiten Epidermisgeneration. Diese entwickelt sich, zeitlich etwas unterschiedlich, in allen Hufsegmenten. Die zweite Epidermisgeneration ist gekennzeichnet durch die Ausbildung eines Stratum granulosum und verhornt in allen Hufsegmenten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien nach dem Prinzip der weichen Verhornung. Das Stratum corneum der zweiten Epidermisgeneration erhält korrespondierend zu der die Ausbildung des segmentspezifischen Papillarkörpers seine spezifische Architektur in Form von Hornröhrchen bzw. Hornblättchen. Die zweite Epidermisgeneration zeigt sich auf der Distalfläche des Hufes eines neugeborenen Fohlen als weich-elastische Epithelmasse. Diese wird von älteren Autoren (ZIETZSCHMANN u. KRÖLLING, 1955) als „Eponychium“ bezeichnet. BRAGULLA (1991, 1996) führt dagegen den Begriff der „hinfälligen Hornkapsel“ (*Capsula unguis decidua*) für diese meist unpigmentierte Epithelmasse ein, da der Begriff des Eponychium auch das Horn des Saumsegmentes bezeichnet.

Während der DRITTEN PHASE der Hufentwicklung kommt es nach der Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers lediglich zu einer Größenzunahme der Hufstrukturen. Der Papillarkörper hat mit Abschluss der zweiten Entwicklungsphase des Hufes seine endgültige Form erreicht. Im Bereich des Epithel kommt es zur Ausbildung der dritten



Epidermisgeneration. Dabei bildet sich die für jedes Segment typische Epidermis (Epidermisform und Verhornungsmodus) aus, welche auch am adulten Pferdehuf zu finden ist.

### **2.6.5 DIE EMBRYONALE ENTWICKLUNG DES NAGELS (FINGER- BZW. FUßNAGEL)**

Die Nagelentwicklung beginnt beim Menschen in der NEUNTEN SCHWANGERSCHAFTSWOCHE (ZANDER, 1884). Innerhalb des Mesenchym der Phalangenspitze differenzieren sich die ersten Gefäße aus (ZAIAS, 1963). Das darüber liegende Epithel ist zu diesem Zeitpunkt zweischichtig und setzt sich aus dem oberflächlichen Periderm und dem tiefer liegenden Stratum germinativum zusammen. Durch eine Epithelverdickung - das Epithel wird dreischichtig: Stratum germinativum, Stratum intermedium und Periderm - im dorsalen Bereich der Fingerspitze entwickelt sich das „primäre Nagelfeld“ (ZAIAS, 1963; ZANDER, 1884). Dieses wird ab der dreizehnten Woche von einem epithelialen Wall begrenzt. Am proximalen Nagelfeldrand entsteht durch die Epitheleinsenkung im distalen Fingerabschnitt ein Nagelfalz. Dieser wird auch als „primärer Nagelgrund“, das „primäre Nagelfeld“ auch als Eponychium bezeichnet (UNNA, 1876).

Nach der Ausbildung des PRIMÄREN NAGELFELDES (ZAIAS, 1963), ab zirka der elften Embryonalwoche, bildet sich ein Papillarkörper an der Fingerspitze aus. Die Epidermis wird vierschichtig und setzt sich aus einem Stratum germinativum, einem mehrere Schichten dicken Stratum spinosum, einem Stratum granulosum und einem Stratum corneum zusammen. Die proximale Matrix, das proximale Nagelfeld, lässt sich in einen dorsalen und einen ventralen Teil untergliedern (HASHIMOTO, 1966). Die Zellen verhornen nach HASHIMOTO (1966) alle unter Bildung von Keratohyalin granula, also nach dem Modus der weichen Verhornung. ZAIAS (1963) beschreibt im distalen Nagelbereich eine parakeratotische Schicht, die ohne ein Stratum granulosum entsteht. Im Bereich der Fingerspitze haben sich bis zu diesem Entwicklungsstadium folgende epidermale Zonen ausgebildet: die Nagelbettepidermis, die Epidermis des Nagelwalles, sowie die dorsale und ventrale Matrix innerhalb der Nageltasche (ZAIAS, 1963). Die Nagelbettepidermis besteht aus einem Epithel mit einem Stratum granulosum, das Epithel distal davon unterscheidet sich von dieser, indem es kein Stratum granulosum und kein Stratum corneum ausbildet (terminaler Bereich des Nagelbettes oder Sohlenabschnitt). ZAIAS (1963) nennt diesen Bereich den „Vornagel“.

Ab der vierzehnten Woche treten erste kollagene Faserbündel innerhalb der Dermis des Nagels auf. Durch die dermo-epidermale Interaktion kommt es zu Einkerbungen der Dermisoberfläche. Am Ende dieser Entwicklungsperiode, ab der siebzehnten Woche, gleicht der embryonale Nagel schon einem Nagel eines adulten Menschen (UNNA, 1876; ZAIAS, 1963).

In der Entwicklungsperiode zwischen dem achten und dem neunten Embryonalmonat löst sich das „Eponychium“ von seiner Unterfläche ab. Darunter erscheint nun der „eigentliche Nagel“, welcher, wie das „Eponychium“ auch, über die Fingerkuppe hinaus ragt (UNNA, 1876; ZAIAS, 1963). Des Weiteren folgt die segmentspezifische Ausdifferenzierung des Papillarkörpers. Dabei entstehen Lederhautpapillen (ZAIAS, 1963) im Bereich des Nagelbettes und der Nagelmatrix, die makroskopisch als Lunula sichtbar ist (UNNA, 1876; ZAIAS, 1963). Der Nagel eines Neugeborenen wird schließlich aus der Matrix (epidermales Muttergewebe) der Nageltasche und des Nagelbettes gebildet (ZAIAS, 1963). Beide verhornen ohne Ausbildung eines Stratum granulosum (ZAIAS, 1963; UNNA, 1876). Distal des Nagelbettes gibt es einen Bereich, die terminale Matrix, welche unter Ausbildung eines Stratum granulosum verhornt (ZAIAS, 1963).

## **2.7 KRALLENKRANKHEITEN**

Die Hundekralle ist ein Organ, welches leider häufig in der Praxis vernachlässigt wird. Wenn auch die Krallenerkrankungen bei weitem nicht so einen hohen wirtschaftlichen Stellenwert haben wie z. B. die Klauenerkrankungen des Rindes (MÜLLING, 1993), so gebührt ihnen dennoch ein entsprechendes Maß an Beachtung. Dabei sind fundierte anatomisch-morphologische Kenntnisse die Grundlage für das Verständnis entsprechender Erkrankungen. Wie in der Humanmedizin die Nagelerkrankungen (NICOLOPOULOS et al., 2002; GOODMAN et al. 2002) so stellen Krallenerkrankungen in der Praxis immer noch ein großes Problem dar. Unzureichende diagnostische Möglichkeiten, ungenügende dermatologische und pathophysiologische Kenntnisse und mangelnde Erfahrung erschweren oft eine korrekte Diagnose (NICOLOPOULOS et al., 2002; MUELLER et al., 2000). Ähnlich wie die Nagelerkrankungen des Menschen können Krallenveränderungen durch eine Vielzahl von Ursachen hervorgerufen werden. Traumata, bakterielle Infektionen und Pilzinfektionen, immunmodulierte Erkrankungen wie Pemphigus, Lupus erythematodes, Kälteagglutinationserkrankung, Arzneimittelunverträglichkeit, Vaskulitis und das Lupus-like Syndrom, genauso wie Neoplasien können mögliche Ursachen sein. Die Veränderungen

stellen sich als Onychodystrophie oder Onychodysplasie (Störungen im Nagelwachstum), Onychomalazie (Krallendegeneration), Onycholysis (Ablösung der Nagelplatte), Onychoschisis (Aufsplitterung der Nägel), Onychorrhaxis (abnorme Brüchigkeit), und/oder Onychomadesis (Nagelverlust mit verlangsamtem Wachstum) dar. Sie sind jedoch nicht für eine bestimmte Krankheit pathognomonisch und erschweren damit die genaue Diagnosestellung (MUELLER et al., 2000; NICOLOPOULOS et al., 2002). Doch nicht nur bei Adulten können Krallenerkrankungen auftreten. Auch angeborene Störungen, wie Arthronychie (abnorme Krümmung) und Anonychie (Fehlen der Krallen) werden in der Literatur beschrieben (MULLER et al. 1993 b). Die Forschung über kongenitale und hereditäre Nagelveränderungen ist in der Humanmedizin im Vergleich zur Veterinärmedizin schon weiter fortgeschritten. So beschreibt FISTAROL (2002) in einer Arbeit über Nagelveränderungen oder Genodermatosen, dass Embryopathien des Nagels meist erblich bedingt sind, während Fetopathien eher aufgrund vaskulärer oder mechanischer Störungen in dieser Periode auftreten. Im Besonderen heben die Autoren hervor, dass Nagelveränderungen die früheste Erkennungsmöglichkeit für hereditär bedingte ektodermale Syndrome beim Menschen sind. Mit diesen Kenntnissen wird verständlich, warum eine Arbeit über die Entwicklung der Hundekralle auch für die Hundepaxis einen wichtigen Beitrag leisten kann.