

V. DISKUSSION

Die Katzenkrallen sind ein interessanter Untersuchungsgegenstand, ist die Katze doch - meines Wissens als einziges Haustier - befähigt, beim Wetzen der Krallen den äußeren Teil der Krallenhäute als ein zusammenhängendes Ganzes abzustreifen. Die Befähigung, dies zu tun, muß in der Struktur der Krallen ihren Ursprung haben. Das heißt, daß die Katzenkrallen deutliche Unterschiede zur Hundekralle aufweisen muß, bei der dieses Phänomen nicht auftritt, mit der die Katzenkrallen aber in der Literatur stets zur „Fleischfresserkrallen“ begrifflich zusammengefaßt wird. Um aber nun den Aufbau eines Organes zu verstehen, sind nach ERNST (1954) Kenntnisse zur onto- und phylogenetischen Entwicklung desselben nötig. Bisher wurden in der neueren Zeit nur von KATO (1977) entsprechende Untersuchungen über die fetale Katzenkrallen durchgeführt. In Anbetracht der zunehmenden Bedeutung der Katze in der Heimtierhaltung sind weitere Untersuchungen dringend geboten.

Für die hier vorliegenden Untersuchungen zur Entwicklung der Katzenkrallen wurden 22 Katzenfeten herangezogen. Die Größe der Feten reicht von 40 bis 160 mm Scheitelsteißlänge (SSL). Mit einer durchschnittlichen Zunahme der SSL um 5 mm pro Fetus kann die „kontinuierliche Entwicklung“ nachvollzogen werden, die nach REMANE et al. (1974) ein Homologiekriterium darstellt. Jede untersuchte SSL war mit nur einem Fetus vertreten. Da die Katzenfeten der embryologischen Lehrmittelsammlung des Institutes für Veterinär-Anatomie entnommen wurden, konnte nur über die gemessene SSL und über Wachstumskurven in der Literatur (EVANS und SACK, 1973) das fetale Alter der Kätzchen ermittelt werden. Gerade diese Art der Altersbestimmung ist aber gegen Ende der Trächtigkeit problematisch, hängt sie doch sehr von der Wurfgröße ab, über die es bei den hier verwendeten Katzenfeten keine Angaben gab. **Kätzchen gingen bis zu einem Lebensalter von 22 Tagen in die Untersuchungen mit ein.** Katzen gehören zu den Nesthockern. Sie können frühestens mit 15 bis 17 Tagen auf den Ballen ihrer Beine stehen und ungeschickt herumlaufen. Erst in der fünften bis sechsten Lebenswoche kommt es bei den Kätzchen zu Bewegungsspielen, in denen die Krallen effektiv eingesetzt werden (BAERENDS-VAN ROON u. BAERENDS, 1979). Bei dem ältesten untersuchten Kätzchen von 22 Tagen kam es also noch nicht zu einem artgemäßen, physiologischen Einsatz der Krallen, entsprechend dem adulter Katzen. Das läßt die Vermutung zu, daß nach dem 22. Tag p.n. weitere strukturelle und funktionelle Entwicklungsschritte ablau-

fen, die in dieser Untersuchung nicht erfaßt wurden und Ziel weiterführender Forschungen sind.

Die Entwicklung eines Organs - auch des Zehenendorgans Kralle - erfolgt kontinuierlich. Es ist sinnvoll, diese Entwicklung anhand prägnanter Strukturen der Kralle in mehrere Abschnitte zu gliedern. **Aufgrund der Untersuchungsergebnisse läßt sich die Entwicklung der Katzenkralle in vier Abschnitte zusammenfassen.** Dieser Einteilung liegt die Betrachtung der Entwicklung der einzelnen Segmente zugrunde, welche tierartübergreifend bei jedem Zehenendorgan vorkommen. Krone, Wand, Sohle und Ballen differenzieren sich im zweiten Entwicklungsstadium, das Saumsegment im dritten. Jedes der Segmente setzt sich aus den Geweben Epidermis, Dermis oder Lederhaut und Subkutis zusammen, sofern letztere ausgebildet ist.

KATOs (1977) Untersuchungen zur Katzenkralle beschränken sich überwiegend auf die Epidermis, die Entwicklung der Lederhaut und ihres Papillarkörpers, der Subkutis und des Krallenbeines blieben unberücksichtigt. Dadurch wird er der Ontogenese des Organs Kralle, welches aus mehreren Geweben besteht, nicht gerecht. Weiterhin hat er an der Kralle keine Segmenteinteilung vorgenommen, die es ermöglicht, die Entwicklung der Katzenkralle mit der anderer Zehenendorgane zu vergleichen. Durch die alleinige Betrachtung der Epidermis **gelangt KATO (1977) zu einer deskriptiven Bündelung der Entwicklung in sechs Abschnitte.** Sein Probenmaterial umfaßt gegenüber dem hier vorliegenden Material noch jüngere Feten ab einer Scheitelsteißlänge von 13 mm, reicht aber nur bis zu einer SSL von 115 mm. Allein fünf Entwicklungsabschnitte beziehen sich auf Feten bis 45 mm SSL, das sechste Stadium basiert auf Feten von 54 mm bis 115 mm SSL.

Durch die unterschiedliche Betrachtungsweise der Krallenentwicklung in der hier vorliegenden Untersuchung und der von KATO (1977), läßt sich die Einteilung in die verschiedenen Entwicklungsabschnitten nicht vergleichen.

Da sich Nagel einerseits und Klaue und Huf andererseits im Zuge der Phylogenese aus der Kralle entwickelt haben (BOAS, 1883; ZIETZSCHMANN, 1918), weisen die verschiedenen Zehenendorgane grundsätzlich einen gemeinsamen - vergleichbaren - Grundbauplan auf. **Die Struktur steht jedoch in Abhängigkeit zur Funktion** und variiert deshalb bei den Organen der unterschiedlichen Spezies. Dies beeinträchtigt natürlich auch die Entwicklung derselben (z. B. entsteht das permanente Sohlenhorn, dem keine tragende Funktion zukommt, bei der

Katze erst unmittelbar vor der Geburt in Form weniger Zellagen). Die unterschiedliche Funktion erklärt die zeitliche Verzögerung der Entwicklung der Krallen an der Hintergliedmaße. Die Hinterbeine liegen während der postnatalen Entwicklung innerhalb der ersten zwei Wochen bis zu den Sprunggelenken auf dem Boden auf (Plantigradie). Während die Vorderbeine und mit ihnen die Krallen frühzeitig als Werkzeug eingesetzt werden können (z. B. beim sogenannten „Milchtritt“), dienen die Hinterbeine, zumindest zu Beginn der postnatalen Entwicklungsphase, nur der Fortbewegung (BAERENDS-VAN ROON u. BAERENDS, 1979).

Schon bei Feten mit 75 mm SSL, d. h. zu Beginn des zweiten Entwicklungsstadiums gleicht die **Form der Kralle** der adulter Katzen. Dies entspricht den Befunden von BRAGULLA (1996) beim Pferdefetus und von KORTE (1987) beim Schaffetus, die schon sehr früh die tierartlich typische Ausformung des Zehenendes zum Huf, bzw. Klaue beobachten konnten. Die Katzenkralle ähnelt in ihrer Form einer Sichel oder auch der Schneide eines Obstmessers. Dorsal und palmar existiert an ihr eine konkave Krümmung. Die palmare Krallenkontur wird im Verlauf der Krallenentwicklung durch die Zellmassen der hinfalligen Krallenkapsel verdeckt, ein Vorgang, der auch bei Pferd (BRAGULLA, 1996), Schaf (KORTE, 1987) und Rind (DIRKS, 1985) zu beobachten ist. Sehr frühzeitig lassen sich an der fetalen Kralle - als erste Differenzierung in Segmente - Krallenplatte und Krallensohle unterscheiden. Gegenüber der Hundekralle besitzt die Katzenkralle eine ausgeprägte dorsopalmare (vertikale) Ausrichtung, die sich schon früh in der Entwicklung abzeichnet. Grund ist die markante Ausbildung des Rückenwulstes.

Eine erste segmentale Einteilung der adulten Fleischfresserkralle wurde von BOAS (1894) und ZIETZSCHMANN (1918) vorgenommen. Abschnitte der Kralle wurden mit den Begriffen Krallenplatte, Krallensohle, Krallenwall, Krone und Ballen belegt. Dabei erkennt ZIETZSCHMANN (1918) sehr deutlich, daß diese Krallenabschnitte nicht nur von der Epidermis, sondern auch von der ihr unterliegenden Dermis geprägt werden. Er ignoriert aber die Tatsache, daß sich die epidermale Matrix und das von ihr gebildete Horn nicht unbedingt in demselben Krallenabschnitt befindet. Dies macht die **Einteilung der Kralle in die verschiedenen Segmente** sinnvoll. Diese grenzen sich durch ihre Lagebeziehung zueinander und der spezifischen Modifikation der beteiligten Gewebe Epidermis, Lederhaut und Subkutis voneinander ab. Ein Schwerpunkt, bzw. Hauptkriterium - entsprechend der Homologie / Homonomie (PREUSS, 1957) - zur Definition eines bestimmten Segmentes liegt hierbei, neben der Topographie der Segmente, in der dermoepidermalen Oberflächenkonfiguration. Ein weiteres Ho-

mologiekriterium betrifft die Hornproduktion bezüglich der Qualität und Quantität, die nur als untergeordnetes Homologie-Kriterium gewertet werden kann (BUDRAS und SEIDEL, 1992).

Das **Saumsegment** schließt sich distal an das Integumentum commune an, welches in Form einer behaarten Hautfalte über der Krallen liegt. Diese lose aufliegende Hautfalte verstreicht weitestgehend beim Ausfahren der Katzenkrallen (WÜNSCHE und PREUSS, 1972). Auf der Dorsal- und Lateralseite der Krallenbasis liegt unter dieser behaarten äußeren Hautfalte eine haarlose innere Hautfalte, die eng mit der Krallenplatte verbunden ist. Die Lage dieser inneren Hautfalte verändert sich beim Krallenausfahren nicht. Ihre gesamte Innenseite, die sich bis zum proximalen Umschlagpunkt der Epidermis im Grund der Krallentasche erstreckt, entspricht dem Saumsegment. Gegenüber der Hundekralle existieren also zwei Hautfalten, wobei die innere haarlos und im Vergleich zur äußeren Haut modifiziert ist. Zur besseren Unterscheidung ist es angebracht, die nur bei der Katze vorkommende haar- und drüsenlose innere Falte als Saumfalte anzusprechen, da sich das Saumsegment über deren gesamte Innenseite ausdehnt. Die äußere Falte wäre als behaarte Hautfalte zu bezeichnen. Die zwei Falten an der Katzenkrallen begrenzen eine äußere Krallentasche (*Sinus unguicularis externus*) zwischen der Hautfalte und der Saumfalte sowie eine innere Krallentasche (*Sinus unguicularis internus*) zwischen Saumfalte und Krallenplatte. Der Begriff Krallenwall, der beim Hund existiert (BUDRAS, 1996; BUDRAS und SEIDEL, 1992), ist für die Katze ungeeignet, da sich die beim Hund so bezeichnete Struktur bei der Katze auf die äußere Hautfalte und die innere Saumfalte der Katzenkrallen erstreckt.

Das Saumsegment ist das zeitlich zuletzt gebildete Segment in der Entwicklung der Katzenkrallen. Seine Entstehung ist das Hauptmerkmal des dritten Entwicklungsabschnittes, der Feten mit einer SSL von 109 bis 145 mm umfaßt. Die Saumfalte entwickelt sich aus der Innenseite der Hautfalte. Die Hautfalte ist vor der Entstehung der Saumfalte im proximalen Teil der Innenseite ebenfalls unbehaart. Die Bildung des Saumsegmentes geht von Epithelzellsprossen der Hautfalte aus. Sie beginnt in den palmar gelegenen Seitenbereichen der Hautfalte und setzt sich in Richtung Krallenrücken fort. Mit 150 mm SSL hat sich die Saumfalte durchgängig von der Hautfalte abgesetzt. Die proximale Innenseite der Hautfalte wird zur gesamten Innenseite der Saumfalte, die Außenseite der Saumfalte und die proximale Innenseite der Hautfalte bilden sich durch die Abschnürung der Saumfalte und Proliferation neu. Die Saumsegmentepidermis der Katzenkrallen setzt sich aus zwei Abschnitten zusammen. Der distale Abschnitt ist durch ein Stratum granulosum gekennzeichnet, der proximale Abschnitt nicht. Dadurch be-

dingt, wird Saumhorn verschiedener Qualitäten gebildet. Nach Durchlaufen eines Stratum granulosum entsteht wie beim Hund (BUDRAS und SEIDEL, 1992) weich-bröckliges Horn, das sich als Wulst in der inneren Krallentasche befindet. In Bereichen ohne Stratum granulosum entsteht hartes Horn, das als äußerste, dünne Glasurschicht auf der Kralle liegt und mit dieser etwa bis zum freien Rand der Saumfalte heruntergeschoben wird. SEIDEL (1992) sieht bei der Saumsegmentepidermis der Hundekralle ebenfalls, daß das Stratum granulosum nicht bis zum Grund des Sinus unguicularis reicht. Er beobachtet aber nur das weich-bröcklige Saumhorn, welches nach BUDRAS et al. (1996) der Glasurschicht des Pferdehufes entspricht. Nach neueren Untersuchungen durch BUDRAS (unveröffentlichte Befunde) existieren auch beim Pferd zwei verschiedene Saumhornqualitäten, die die Glasurschicht und den Saumhornwulst bilden.

Das **Kronsegment** liegt im Anschluß an das Saumsegment dorsal und lateral an der Krallenbasis. Es beginnt, wie beim Hund, am Grunde des Sulcus unguicularis. Bei unseren Haussäugetieren ist das Kronsegment durch das Vorhandensein eines zöttchenförmigen Papillarkörpers gekennzeichnet. Das Fehlen eines Papillarkörpers während der fetalen Entwicklung der Katze erschwert die Abgrenzung des Kronsegmentes bei dieser Spezies. Das deckt sich mit den Angaben von SIEDAMGROTZKY (1870), der bei adulten Katzen ebenfalls lichtmikroskopisch bzw. mesoskopisch keine Papillen erkennen kann. Eigene, noch unveröffentlichte Befunde an rasterelektronenmikroskopischen Präparaten adulter Katzen zeigen einen auf niedrigen transversalen Leisten stehenden zöttchenförmigen Papillarkörper geringer Größe.

Ein weiteres Kriterium zur Homologie dieses Segmentes ist die Existenz einer Subkutis. SEIDEL (1992) macht beim Hund keine Angaben zur Subkutis, SIEDAMGROTZKY (1870) und GÜCKEL (1922) schreiben, daß die Subkutis des Kronsegmentes bei der Fleischfresserkralle dünn und fest mit dem Periost des Krallenbeines verbunden ist. BRAGULLA (1996) sieht in Übereinstimmung mit ERNST (1954) und ZIETZSCHMANN (1918) im ersten Viertel der fetalen Entwicklung des Pferdes die Ausbildung eines Subkutispolsters, der sich die Ausformung des segmentspezifischen Papillarkörpers anschließt. Die Entstehung der Kronsegmentsubkutis erfolgt bei der Katze im vierten Entwicklungsabschnitt. Dadurch lassen sich die Grenzen des Kronsegmentes - gemäß der verzögerten Entwicklung der Katzenkralle im Vergleich zu anderen Zehenendorganen - erst sehr spät festlegen. In der Dorsomedianen liegt die Grenze zum Wandsegment sehr weit distal. Etwa das proximale Drittel des Rückenwulstes wird u.a. durch das Vorhandensein eines Subkutispolsters zum Kronsegment gerechnet. Diese

Befunde entsprechen denen von BUDRAS und SEIDEL (1992) beim Hund. Die dorsodistale Ausdehnung des Kronsegmentes auf den Rückenwulst ist aber bei der Katze weitaus ausgeprägter als beim Hund und ähnelt daher eher dem menschlichen Fingernagel, dessen Kronsegment, als Lunula bezeichnet, in der Dorsomedianen weit distal reicht.

Ein weitere Eigentümlichkeit des Kronsegmentes ist die hohe Hornproduktionsrate seiner Epidermis. Diese veranlaßte ältere Autoren zur Prägung des Begriffes „fertile Matrix“ für die Germinativzellen der Epidermis. Die Hornmassen der Seitenteile der Krallentüte haben ihren alleinigen Ursprung aus lateral gelegenen Bereichen der Kronsegmentepidermis. Die über viele Zellagen verhornenden und jung verhornten Zellen fallen im lichtmikroskopischen Bild durch ein intensives Farbverhalten auf. Dies und die isoprismatischen Basalzellen unterscheiden die Kronsegmentepidermis deutlich von der Wandsegmentepidermis.

Das **Wandsegment** schließt sich distal an das Kronsegment an. Es wird bei der Katze durch den, aus dermalemem Bindegewebe bestehenden, distalen Zweidrittel des **Rückenwulstes** geprägt, den KATO (1977) bei der Entwicklung der Katzenkralle völlig unerwähnt läßt. Sein proximales Drittel ist aufgrund des Vorhandenseins einer Subkutis und fehlender Mikroblättchen zum Kronsegment zu zählen (siehe oben). Eine genauere Abgrenzung von Kron- und Wandsegment läßt sich nur anhand rasterelektronenmikroskopischer Untersuchungen adulter Katzenkrallen durchführen. Der Rückenwulst der Katze ist gegenüber dem des Hundes extrem hoch und schmal. Die Bildung des Rückenwulstes deutet sich schon sehr früh - gegen Ende des ersten Entwicklungsabschnittes - an: In einem in der Krallenmitte gelegenen Querschnitt zeigt die dorsal des Krallenbeines gelegene Lederhaut eine geringere laterale Ausdehnung als die um das Krallenbein gelegene. Ab dem zweiten Entwicklungsstadium kommt es zu lateralen Lederhauteinschnürungen an der Rückenwulstbasis, die nun schmaler als das freie, dorsale Ende des Rückenwulstes ist. Dies und eine Größenzunahme setzen sich im Laufe der Entwicklung fort, bis der krallenbeinnahe Teil des Rückenwulstes in einem Querschnitt nur noch als ein langer und schmaler, wenige Bindegewebszellagen umfassender, Steg sichtbar ist. Das freie Ende setzt sich im Querschnitt knopfförmig vom Steg ab. Distal flacht der Rückenwulst im Bereich des apikalen Lederhautüberzuges des Krallenbeines wieder ab. Bei der Hundekralle grenzt sich der Rückenwulst nur durch eine bilaterale falzartige Vertiefung von der restlichen, das Krallenbein umgebenden, Lederhaut ab (SEIDEL, 1992). Er hat im Vergleich zu dem der Katze eine breitere Basis und geringere Größe. Die von BUDRAS und SEIDEL (1992) beobachtete dorsoaxiale Einsenkung des Rückenwulstes existiert bei der Katzenkralle

nur in den distalen Bereichen, in denen die Größe des korialen Wulstes abgenommen hat. Die Lederhaut, die das Krallenbein lateral des Rückenwulstes beidseitig umgibt, stellt den dermalen **Seitenteil des Wandsegmentes** dar.

Die Oberfläche des zum Wandsegment gehörenden Anteiles des Rückenwulstes und der Seitenflächen wird wie beim Hund von einem Papillarkörper aus Mikroblättchen eingenommen. Die blättchenförmige Oberflächenkonfiguration entspricht den Verhältnissen im Wandsegment anderer Zehenendorgane und ist deshalb das wichtigste Homologie-Kriterium. Postnatal erreichen die Mikroblättchen an den Seitenflächen und der Rückenwulstbasis ihre maximale Höhe und sind dabei stark in Richtung Krallenrücken geneigt. Dies ist ein Ausdruck der auf diesem Gewebe herrschenden Zugkräfte, die durch den distalen Schub der Krallentüte und den Krallengebrauch entstehen.

Die Epidermis des Wandsegmentes unterliegt der harten Verhornung mit Ausnahme des an der Grenze zur Sohle gelegenen Terminalbereiches, in dem - bei Durchlaufen eines Stratum granulosum - eine weiche Verhornung stattfindet. Dabei zeigen die verschiedenen Wandsegmentabschnitte ein unterschiedliches Verhalten bezüglich ihrer Hornproduktionsrate. Dorsal wird über dem Rückenwulst sehr viel Horn produziert. Durch die sehr schmale Verbindung zur Rückenwulstbasis nimmt die intensiv verhornende Epidermis auf dem Querschnitt nahezu einen Dreiviertelkreis ein. Es entstehen so ineinander geschichtete Hornkegel, deren Zellen konzentrisch um den Rückenwulst angeordnet sind. Dies verleiht der Krallenplatte einerseits eine außerordentliche Festigkeit und andererseits die Fähigkeit die äußerste Hülse abzuwetzen, wie es auch an den Hornschuppen von Reptilien erfolgt.

Proximal dehnt sich das hohe Proliferationsvermögen der Epidermis auf die Basis des Rückenwulstes aus. Im krassen Gegensatz dazu stellt sich die Epidermis der Seitenflächen dar. Sie besteht aus nur zwei Schichten, dem einschichtigen, extrem hochprismatischen und zum Krallenrücken geneigten Stratum basale und einem isoprismatischen Stratum intermedium. Eine Verhornung findet in diesen Bereichen nicht statt. Dies stellt eine Abweichung zu den Befunden anderer Zehenendorganen dar, die bei Pferd, Rind und Hund zumindest eine geringe bis mittelgradige Hornproduktionsrate aufzeigen. Das einschichtige Stratum intermedium dient dem Gleithaftmechanismus, dem Distalgleiten der Hornplatte, wie ihn BUDRAS und PREUSS (1979) beschrieben haben.

Ab dem zweiten Entwicklungsstadium hebt sich die dorsodistal gelegene **Epidermis des terminalen Wandsegmentes** durch ein Stratum granulosum mit der daraus resultierenden Produktion weichen Hornes vom restlichen Wandsegment ab. Die Terminalepidermis liegt am

Übergang von der Wand- in die Sohlensegmentepidermis. Ihr weiches Horn entspricht einem Anteil der Weißen Linie, wie sie bei anderen Spezies beschrieben ist. Im Gegensatz zu anderen Tieren stellt sich der Terminalbereich - zumindest beim Fetus und Neonatus - nicht durch einen spezifischen, zöttchenförmigen Papillarkörper dar, gleicht aber in seiner hohen Hornproduktionsrate der von Hund, Rind und Pferd. Während der fetalen Entwicklung der Katzenkrallen ist die Terminalepidermis der einzige Teil des Wandsegmentes, der Zellmassen der hinfälligen Krallenkapsel produziert (Siehe dazu Seite 88 dieses Kapitels).

Das **Sohlensegment** der Katzenkrallen befindet sich wie beim Hund palmar des Krallenbeines. Ab dem zweiten Entwicklungsstadium unterscheiden sich Lederhaut und Epidermis dieses Segmentes von denen der anderen Krallenabschnitte. Bis zur Geburt entsteht ein ausgeprägter blättchenförmiger Papillarkörper. Dies steht nicht im Widerspruch zu dem bei anderen Tierarten wie Pferd, Wiederkäuer und Schwein, vorgefundenen zöttchenförmigen Papillarkörper, da die proximale Grundstruktur blättchenförmig ist. BUDRAS und SEIDEL (1992) weisen im Sohlensegment der Hundekralle Zöttchen nach, die sich von einer longitudinal ausgerichteten blättchenförmigen Lederhautunterlage abschnüren. BRAGULLA (1996) beobachtet bei der Entwicklung des Pferdehufes die Entstehung der Sohlensegmentzöttchen auf den Firsten niedriger Lederhautleisten. Dieses Prinzip der Zöttchenentstehung gilt auch für die anderen, zöttchenträgenden Segmente. Die Frage, ob es bei der Katze postnatum zu einer Zergliederung der longitudinal ausgerichteten Blättchen zu Sohlenzöttchen kommt, ist noch zu klären. Bis zum ältesten untersuchten Kätzchen von 21 Tagen erfolgt keine Zergliederung. Die Bildung des Papillarkörpers geht, wie von BRAGULLA (1996) beobachtet, von der Epidermis aus. Mitotisch aktive Areale der Basalzellen dringen als Sprossen in die Lederhaut vor und zerteilen die glatte Lederhautoberfläche zu Blättchen, die sekundär einen Zöttchenbesatz erhalten. Typisch für die Katze ist die - beim Hund nicht existierende - axolongitudinal ausgerichtete bindegewebige Sohlenfalte. Sie deutet sich schon mit 75 mm SSL an und entwickelt sich in proximodistaler Richtung; ihre Ausprägung bleibt postnatal erhalten.

Im Laufe der fetalen Krallenentwicklung liegen im Sohlensegment drei verschiedene Epidermisgenerationen vor, wie sie BRAGULLA (1996) beim Pferdehuf beschrieben hat. Die erste Epidermisgeneration, die einem glatten Papillarkörper aufliegt, zeigt in allen Segmenten ein einheitliches Aussehen, ihr fehlt generell ein Stratum granulosum. Die zweite Epidermisgeneration, die BRAGULLA (1996) in allen Segmenten des Pferdehufes beobachtet hat und begrifflich zur „hinfälligen Hufkapsel“ zusammengefaßt hat, existiert bei der Katzenkrallen nur

im Sohlen- und terminalen Wandsegment (siehe dazu Seite 88 in diesem Kapitel). Die dritte Epidermisgeneration stellt das permanente Sohlenhorn dar. Dessen Produktion setzt erst unmittelbar postnatal und dann ziemlich schlagartig ein. Über der Sohlenlederhautfalte zeigt die Epidermis ein Spitzenwachstum, während sie über dem, auf den Abhängen der Sohlenlederhautfalte liegenden Blättchenpapillarkörper ein ausgleichendes Wachstum zeigt. Das späte Entstehen des permanenten Stratum corneum ist funktionell bedingt: Die Sohlenfläche der neonaten Katzenkrallen hat keine Tragefunktion (neugeborene Katzen sind Nesthocker, später laufen sie auf den Zehen- und Sohlenballen) und ist zudem durch die nach innen geneigten Seitenteile der Krallentüte geschützt.

Das **Ballensegment** ist (wie beim Hund) aus der Krallenwurzel ausgelagert. Es gehört bei engefaßter Definition nicht zur Krallenwurzel und wurde deshalb bei der hier vorliegenden Untersuchung weitgehend unberücksichtigt gelassen. Trotzdem soll auf die Problematik der Bezeichnungen Zehenballen (Torus digitalis), Sohlenballen (Torus metacarpeus resp. metatarsus) und Fußwurzelballen (Torus carpeus resp. tarsus) hingewiesen werden, da diese Begriffe nicht mit den Ballen anderer Zehenendorgane homologisierbar sind. Nur der Zehenballen der Katze entspricht dem Ballensegment anderer Zehenendorgane. Der Begriff Sohlenballen sollte nicht verwendet werden. Er ist nur funktionell bedingt nachvollziehbar, da dieser Ballen die Lauffläche darstellt, aber nicht mit der Sohle von Huf und Klaue homolog ist. Statt dessen ist der Begriff Metakarpal- bzw. Metatarsalballen vorzuziehen.

Das **Krallenbein** wird schon sehr früh, während des ersten Entwicklungsstadiums hyalin-knorpelig angelegt. Im Gegensatz zur Phalanx media und proximalis, die von der Mitte her zu beiden Knochenenden hin verknöchern, geschieht dies bei der Phalanx distalis distoproximal. Die Richtung der Verknöcherung von der Krallenbeinspitze zur Krallenbeinbasis entspricht der des Krallenbeines beim Hund (SCHAEFFER, 1934), des Hufbeines beim Pferd (BRAGULLA, 1996), des Klauenbeines beim Rind (CARLENS, 1927), beim Schaf (SINOWATZ, 1991, KORTE, 1987) und beim Schwein (ZIETZSCHMANN und KRÖLLING, 1955). Im Unterschied zum Nestflüchter Pferd, das mit einem vollkommen verknöcherten Hufbein geboren wird, ist das Krallenbein der Katze zum Zeitpunkt der Geburt nur etwa zu Zweidrittel verknöchert. Die knöcherne Krallenleiste (Crista unguicularis) wird erst spät postnatal gebildet, denn SCHAEFFER (1932 und 1934) erkennt bei der Katze erst im Alter von 251 Tagen einen

2 mm tiefen knöchernen Krallenfalz, beim Hund erst im Alter von 255 Tagen einen 1 mm tiefen Krallenfalz.

Ab dem dritten Entwicklungsstadium sind in der das Krallenbein umgebenden Lederhaut Bindegewebsfasern zu beobachten, die vom Krallenbein bis an die Epidermis heranreichen. Die Kollagenfasern entsprechen dem bindegewebigen Anteil des Hufbeinträgers, den PELLMANN (1995) und HENKE (1997) beim Pferd beschrieben haben. An der mit einer bindegewebigen Kappe verstärkten Krallenbeinspitze inserieren besonders viele Fasern, die fächerartig in Richtung Krallenplatte ausstrahlen, vergleichbar mit der distalen Verstärkung des Hufbeinträgers des Pferdes, die die Hufplatte am Hufbein verankert und dem Zug der tiefen Beugesehne zur Verhinderung einer Hufbeinrotation entgegenwirkt. Die Funktion des Hufbeinträgers liegt nach BUDRAS et al. (1995) darin, die Druckkraft, die auf dem Hufbein lastet, in eine Zugkraft umzuwandeln. Bei der Kralle geht der Druck von der Krallenspitze (beim Ausfahren und Gebrauch der Kralle) aus und wird über die kollagenen Fasern in einen Zug umgewandelt, der am Krallenbein in einen Druck rückgewandelt wird, welcher proximal auf die proximalen Zehenknochen übertragen wird. Es handelt sich um einen Krallenträger, nicht um einen Krallenbeinträger. Durch den Krallenträger, der keinen epidermalen Anteil aufweist, wird die Krallentüte (Krallenplatte) getragen und am Krallenbein verankert. Die tiefe Beugesehne und die starken elastischen Bänder an der Katzenkralle werden den Krallenträger ebenfalls beeinflussen (FINDEISEN, 1922; BRUHNKE, 1928).

Wie aus der vorangegangenen Beschreibung der einzelnen Krallensegmente zu ersehen, gibt es deutliche Unterschiede zwischen der Katzenkralle und der Hundekralle. Dies wirft auch die Frage auf, welche der beiden Krallenformen die phylogenetisch ältere ist.

Die **prägnantesten Unterschiede der Katzenkralle zur Hundekralle** werden im folgenden zusammengefaßt und tabellarisch aufgelistet:

Krallenabschnitt	Hund	Katze (basierend auf den eigenen Befunden)
Saumsegment	Innenblatt des nur außen behaarten Hautwalles.	Innenblatt einer vollkommen haarlosen (zusätzlichen) Saumfalte, darüber liegt ein beiderseits behaarter Hautwall

Kronsegment	Die Subkutis ist sehr dünn und mit dem Periost des Krallenbeines eng verbunden (SIEDAM-GROTZKY, 1870; GÜCKEL, 1922). Lederhautzöttchen erheben sich auf transversal gerichteten Blättchen (BUDRAS und SEIDEL, 1992).	Die Subkutis liegt als breiter Streifen um das Krallenbein und ragt in den Rückenwulst hinein. Glatter Papillarkörper beim Fetus.
Wandsegment	Breiter, aber kleiner <u>Rückenwulst</u> , der nur durch eine falzartige Vertiefung von der restlichen Lederhaut getrennt ist. <u>Papillarkörper:</u> <i>Rückenwulst:</i> Mikroblättchen und terminale Zöttchen <i>prox. Seitenflächen:</i> Mikroblättchen <i>distal. Seitenflächen:</i> Blättchen <i>Terminalbereich:</i> Zöttchen auf Blättchenfirsten.	Schmalere und hoher <u>Rückenwulst</u> , der durch einen langen, dünnen Steg von restlicher Lederhaut getrennt ist. <u>Papillarkörper:</u> <i>Rückenwulst:</i> Mikroblättchen bis Blättchen <i>prox. Seitenflächen:</i> hohe Mikroblättchen <i>dist. Seitenflächen:</i> niedrige Mikroblättchen <i>Terminalbereich:</i> glatt (beim Fetus)
Sohlensegment	Zöttchen schnüren sich von einer blättchenförmigen Lederhautunterlage ab.	Blättchenpapillarkörper, ohne Zöttchen beim Fetus. Distal existiert eine ausgeprägte, axial gelegene Lederhautfalte.
Kralle insgesamt	Krallen haben eine stumpfkegelige Form und sind oft pigmentiert.	Krallen haben die Form einer Sichel und sind <u>immer</u> unpigmentiert.
Hornverlust	Durch Abrieb und trimmen	Abwetzen (vordere Krallen) oder Abbeißen (hintere Krallen) von schalenförmigen Horntüten

Die **Kralle** wird von den meisten Autoren (BOAS, 1894; BRUHNS, 1910; ZIETZSCHMANN, 1918; LE GROS CLARK, 1936; ELLENBERGER/BAUM 1943;

KRÖLLING/GRAU 1960) als die **phylogenetische Urform des Zehenendorganes** angesehen. Als Kriterium für die Höherentwicklung müssen einerseits die Streckung und Verlängerung des Gliedmaßenendes und andererseits der Ausformungsgrad des dermalen Papillarkörpers angesehen werden. Die Aufrichtung des Zehenendes geht von der Katze - Sie läuft auf dem sogenannten „Sohlenballen“ und gebraucht die Kralle nur als Werkzeug - über den Hund - die Kralle berührt beim Gehen den Boden - in Richtung Rind und Pferd, welche als Zehenspitzen- bzw. Zehenspitzenrandgänger gelten. Zusätzlich kann man die Entfaltung des Saumsegmentes heranziehen: Die Katze besitzt mit der ausgeprägten, innig mit der Krallenoberfläche verbundenen Saumfalte zwei Hautfalten an der Krallenbasis, beim Hund liegt nur eine Hautfalte vor, auf deren Innenseite sich das Saumsegment befindet. Bei Rind und Pferd ist das Saumsegment nur noch als flacher Wulst ausgebildet. Die falzartige Vertiefung zwischen Saum- und Kronsegment entspricht dem Grund der Krallentasche. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Eingliederung der Katzenkralle in die Phylognese des Zehenendorganes ist der segmentspezifische Bau und Ausprägung des Papillarkörpers. Während der Ontogenese eines Zehenendorgans bilden sich zuerst Blättchen, die im Laufe der Entwicklung in den entsprechenden Segmenten zu Zöttchen zergliedert werden. Dies wird von KUNSIEN (1882) und DIRKS (1985) beim Rind, von KORTE (1987) beim Schaf, von JORQUERA/GARRIDO (1977) beim Schwein und von BRAGULLA (1996) beim Pferd beobachtet. KATO (1977) findet dagegen während der Ontogenese der Katzenkralle nur Blättchen und keine Zöttchen. Der Vorgang der Papillogenese wiederholt sich auch beim adulten Tier bei einer Reparatur des Zöttchenapparates nach Verletzung oder Erkrankung (MARKS, 1984; BUDRAS und HUSKAMP, 1999). SEIDEL (1992) registriert bei der adulten Hundekralle, daß die meisten Zöttchen einem blättchenförmigen Papillarkörper aufsitzen. Dies und die weniger strenge proximodistale Ausrichtung der Blättchen gegenüber der des Pferdehufes, läßt SEIDEL (1992) zu dem Schluß kommen, daß die Hundekralle auf einer niedrigeren Entwicklungsstufe als der Huf steht. Anhand der eigenen Befunde über den Papillarkörper der Katzenkralle muß man diese, verglichen mit der Hundekralle, als die phylogenetisch ältere Kralle betrachten. Während der embryonalen Phasen treten in keinem Segment Zöttchen auf. Der Papillarkörper des Kronsegmentes ist beim Fetus glatt, der des Sohlensegmentes ist blättchenförmig. Es ist nachzuprüfen, ob es während der postnatalen Entwicklung zu einer sekundären Zergliederung dieses Blättchenapparates zu Zöttchen kommt. Im Wandsegment existiert während der fetalen Entwicklung nur ein sehr niedriger Blättchenpapillarkörper in Form von Mikroblättchen, da sich im epidermalen Stratum basale lediglich die Basallamina und die Lamina fibroreticularis

der Basalmembran auffalten. Nicht zuletzt ist als weiteres Merkmal einer niedrigen Entwicklungsstufe das Abwetzen von Hornhülsen bei der Katzenkralle zu werten, die dem Abschuppen einer Hautschuppe ähnelt. BOAS (1931) nennt als möglichen Ursprung der Säugetierkralle die Kralle von Krokodilen, Schildkröten und Vögeln, die nach BOAS endständige Schuppen darstellen.

Die hier vorliegenden Untersuchungen haben ergeben, daß während der Entwicklung der Katzenkralle ab dem zweiten Entwicklungsabschnitt von der Sohlenepidermis und ab dem dritten Entwicklungsabschnitt von der terminalen Wandepidermis bis zur Geburt die **hinfällige Krallenkapsel** gebildet wird. Die Zellen dieser Kapsel gehören nach der Definition von BRAGULLA (1996) zur zweiten Epidermisgeneration. KATO (1977) läßt bei seinen Untersuchungen die hinfälligen Zellmassen völlig unerwähnt. Beim Fohlen werden diese Zellmassen im Gegensatz zur Katze in allen Segmenten gebildet. Die Bildung beginnt beim Huf im Wandsegment (BRAGULLA, 1996). Ebenso wird während der embryonalen Entwicklung des Kalbes eine vollständige Klauenkapsel aus hinfälligen Zellmassen von allen Segmente gebildet (BRAGULLA et al., 1994). Beim neugeborenen Kalb bedecken die Zellmassen der hinfälligen Klauenkapsel, die von DIRKS (1985) als „epidermales Sohlenkissen“ bezeichnet wird, die Sohlenfläche und das distale Wandhorn. KORTE (1987) beobachtet beim Schaffetus in allen Segmenten hinfällige Zellmassen, die von ihr als „primitives Stratum intermedium“ bezeichnet werden. Im Saum- und Kronsegment, bzw. im proximalen Wandabschnitt schilfert nach der Ausbildung eines (permanenten) Stratum corneums das primitive Stratum intermedium vollständig ab, während die Zellmassen vom distalen Wandabschnitt, Sohle und Ballen eine mächtige Schicht bilden. Von BRAGULLA wurde für die hinfälligen Zellmassen beim Pferd der Begriff „hinfällige Hufkapsel“ (1991) und beim Rind „hinfällige Klauenkapsel“ (1994) (*Capsula ungulae decidua*) geprägt. In der älteren Literatur wird dafür der irreführende Ausdruck „Eponychium“ angewandt, mit dem bereits das Hornprodukt des Saumsegmentes bezeichnet wird. Auch wenn an der Katzenkralle nicht von allen Segmenten die hinfälligen Zellmassen gebildet werden, ist es aus Gründen der Homologie berechtigt, diese in ihrer Gesamtheit als hinfällige (unvollständige) Krallenkapsel zu bezeichnen. Es sind bei der Katze zumindest all jene Segmente beteiligt, die bei den anderen Haussäugetieren den mächtigsten Anteil der Huf- oder Klauenkapsel stellen.

Die **Funktion der hinfälligen Zellmassen** der verschiedenen Zehenendorgane liegt im Schutz der Eihäute und der Geburtswege vor scharfkantigen Teilen von Huf, Klaue und Kral-

le. Dies erklärt, warum es bei der Katzenkrallen nur im Bereich der Sohlen- und terminalen Wandepidermis zur Produktion von hinfälligen Zellmassen kommt, die die hinfällige Krallenkapsel darstellen. Durch Anordnung und Form der Segmente der Katzenkrallen muß nur am distalen und palmodistalen Bereich der Krallen hinfällige Zellmassen gebildet werden, um ihrer Funktion zur Abpolsterung scharfer Kanten an der Krallen gerecht zu werden. Diese Zellmassen füllen den Raum zwischen den nach palmar offenen scharfen Krallentütenrändern aus und treten noch weit über deren Rand hervor. Dies ist besonders gut ab 117 mm SSL sichtbar. Während der Krallenentwicklung erfolgt ab 145 mm SSL ein immenses Wachstum der die Krallenbasis bedeckenden Hautfalte. In diesem Bereich ragen die hinfälligen Zellmassen nicht mehr aus der Krallentüte heraus. Die scharfen Krallentütenränder werden durch die Hautfalte verdeckt, die proximal die Schutzfunktion der hinfälligen Krallenkapsel übernimmt.

Die vorliegenden Untersuchungen der **Ultrastruktur der hinfälligen Zellmassen** an der fetalen Katzenkrallen ergeben ein uneinheitliches Bild an Zellen. Der Zelltyp A ist durch ein filigranes Netzwerk aus dünnen und langen Zytokeratinfilamenten, Kernresten in intrazellulären Hohlräumen und Keratohyalin granula unterschiedlichster Größen gekennzeichnet. Der Zelltyp B weist sich durch ein aus dickeren Zytokeratinfilamenten bestehendes engmaschigeres Netzwerk aus, die Keratohyalin granula sind einheitlich klein. Gegenüber dem Zelltyp A sind keine Kernreste erkennbar. In beiden Zelltypen sind weder eine Verstärkung der Zytolemmenseite durch ein marginales Band noch Zellorganellen sichtbar. Lediglich Desmosomen sind erhalten geblieben. Zudem existieren viele extrazelluläre Hohlräume, d. h. extrem erweiterte Interzellularräume. Diese intra- und extrazellulären Hohlräume scheinen bei den anderen Haussäugetieren nicht vorzukommen, einzig GEYER (1980) bemerkt diese bei der hinfälligen Krallenkapsel des Schweines. Lichtmikroskopisch weisen die Keratohyalin granula der hinfälligen Zellmassen der Katzenkrallen ein azidophiles Farbverhalten auf, im Unterschied zu den Keratohyalin granula der permanenten Epidermis, die ein basophiles Farbverhalten zeigen. BOSHELL et al. (1980) hat in der Epidermis der filiformen Papillen an der Schweinezunge eosinophile (d.h. azidophile) Granula beobachtet, die er als eine von mehreren Varianten der ansonsten basophilen Keratohyalin granula wertet. Eine Erklärung des unterschiedlichen Färbeverhaltens könnten Veränderungen der Keratohyalin granula im Zuge des Alterungsprozesses sein. „Junge“ Keratohyalin granula enthalten viele SH-Gruppen, die sauer reagieren und sich daher basophil anfärben. Bei „alten“ Keratohyalin granula kommt es zu einer Umwandlung von SH-Gruppen zu SS-Gruppen. Der Säurecharakter der Granula geht dadurch verloren, es entsteht eine Azidophilie.

Die Struktur der hinfalligen Krallenkapsel ist aufschlußreich hinsichtlich der Keratinisierung und Verhornung. Die Bildung von Zytokeratinen und intermediärfilamentassoziierten Proteinen (ifaP - im Falle der weichen Verhornung legen sie sich zu Keratohyalingranula zusammen) kennzeichnen die **Keratinisierung** von Zellen. Bei einer **Verhornung** kommt es zur Interaktion von Zytokeratinen und ifaP durch Disulfidbrücken. Die Zellorganellen, Zellkerne und Desmosomen werden abgebaut, die Innenseite des Zytolemms wird durch ein marginales Band verstärkt. Die während der Keratinisierung entstandenen MCGs werden ausgeschleust, deren Inhalt als Interzellularkitt im Interzellularraum liegt.

Bei den oben beschriebenen Zellen der hinfalligen Krallenkapsel fehlen entscheidende Schritte der Verhornung, nämlich das Umfließen der Zytokeratine durch ifaP und deren Interaktion durch Disulfidbrücken. Dabei sind die verschiedenen Zelltypen unterschiedlich weit in Richtung Verhornung fortgeschritten. Zelltyp A steht mit seinen noch sehr großen Keratohyalingranula und den Zellkernresten auf einer niedrigeren Entwicklungsstufe als Zelltyp B, deren Zellkerne vollständig abgebaut sind und deren Keratohyalingranula gleichmäßig klein und enger ins filamentäre Zytokeratinnetz eingebaut sind. Fehlende Zellkerne und Zellorganellen kennzeichnen eindeutig tote Zellen. Die hier beschriebenen Zellen sind aber keine Hornzellen, vielmehr erfolgte der Zelltod verfrüht im Stadium des Stratum granulosum. Daher ist es bei der fetalen Katzenkrallenkapsel nicht gerechtfertigt von einer hinfalligen Hornkapsel, sondern vielmehr von einer hinfalligen Krallenkapsel zu sprechen. Der Gebrauch des Ausdruckes „hinfallige Krallenkapsel“, analog der Ausdrücke „hinfallige Hufkapsel“ und „hinfallige Klauenkapsel“, ist aus Gründen der Homologie sinnvoll. Dieses Beispiel der hinfalligen, unvollständigen Krallenkapsel zeigt, wie sinnvoll und notwendig eine Unterscheidung zwischen Keratinisierung und Verhornung ist, die von vielen Autoren nicht vorgenommen oder synonym angewandt wird.

Als **Besonderheit der fetalen Katzenkrallen** muß die Form des vom terminalen Wandsegment gebildeten Hornes gelten (bei den Zellen handelt es sich nach ultrastrukturellen Untersuchungen eindeutig um verhornte Zellen), das die hinfalligen Zellmassen wie eine Hülle oder Gurtung als äußerste Schicht umgibt. Dies wird bei anderen fetalen Zehenendorganen nicht beschrieben. Nur GEYER (1980) berichtet von wenigen Lagen platter Zellen, die als dünne Überzugsschicht an der Oberfläche der hinfalligen Zellen liegen. Er macht keine Angaben über die Herkunft der Zellen. Sinn dieser Gestaltung der oberflächlich gelegenen Hornzellen mag die „Gurtung“ der hinfalligen Zellmassen sein, die bei Katze und Schwein durch ihre vielen und großen intra- und extrazellulären Hohlräume eine geringe Stabilität aufweisen.

Durch die Hohlräume sind die hinfälligen Zellen befähigt, viel Wasser aufzunehmen und damit als druckelastisches Polster zu wirken.

Für die Untersuchung der hinfälligen Krallenkapsel und - darüber hinaus - für die gesamte Kralle kann die Katze als hervorragendes Modell gewertet werden. Die geringe Größe des Zehenendorgans und die verhältnismäßig kurze Tragzeit von nur 60 bis 63 Tagen begünstigen den Einsatz verfeinerter Untersuchungsmethoden, ohne dabei den strukturellen und temporären Gesamtüberblick aus dem Auge zu verlieren. So kann bei lückenloser Berücksichtigung aller Entwicklungsstadien die Kontinuität in der Ontogenese erforscht und so ein wichtiges Homologiekriterium erfüllt werden. Da die Katzenkralle am Anfang der Phylogenese der Zehenendorgane steht, eignet sie sich besonders gut für vergleichende embryologische Betrachtungen.