

# Endogene Einflussfaktoren auf die Hornqualität im Sohlen- und Ballen-Strahlsegment des Pferdehufes Teil 2: Intra- und Interzelluläre Faktoren

Anne-Katrin Frohnes<sup>1</sup> und K.-D. Budras<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tierklinik Hochmoor, Gescher, <sup>2</sup>Institut für Veterinär-Anatomie im FB Veterinärmedizin der FU Berlin

## Zusammenfassung

Im Sohlen- und Ballen-Strahlsegment der rechten Vorderhufe von 25 Warmblutpferden wurden die Veränderungen in den verhornenden Epidermiszellen sowie die Struktur der Hornzellen untersucht.

Während der Verhornung werden Keratinfilamente und intermediärfilamentassoziierte Proteine synthetisiert, die einen Komplex bilden und als Zytoskelett für die Stabilität der Hornzellen verantwortlich sind. Der Interzellularkitt verbindet die Hornzellen miteinander und sichert die Festigkeit des Hornzellverbandes. Bezüglich dieser Faktoren bestehen segmentspezifische Besonderheiten. Die Härte des gebildeten Hufhornes ist nicht proportional zum Feuchtigkeitsgehalt des Hornes, sondern wird entscheidend vom Gehalt an intrazellulären Lipiden beeinflusst. Die segmentspezifischen Unterschiede bezüglich der Hornhärte und des Feuchtigkeitsgehaltes des Hufhornes werden dargestellt. Segmentübergreifend verhornen die Zellen des Röhrchenmarks nur unvollständig und stellen damit eine Prädilektionsstelle für eine bakterielle Besiedlung des Hufhornes dar.

**Schlüsselwörter:** Pferdehuf, Verhornung, Hornqualität, Hornhärte, Keratinfilamente, intermediärfilamentassoziierte Proteine

## Endogenous influences on the horn quality from the sole, bulb and frog segments of the horseshoe.

### Part II: Intra and intercellular factors

The changes in cornifying epidermal cells as well as the structure of the horn cells in the sole, bulb and frog segments of the right forehoof from 25 warm blooded horses were examined.

During keratinization, synthesis of keratin and keratin-filament associated proteins is taking place, forming a cytoskeleton responsible for the stability of the cells. Cornification creates complex compounds by disulphide bonds, leading to solidification. The intercellular cementing substance connects the horn cells and secures the firmness of the horn cell association. Segment specific characteristics concerning these factors are shown in this paper. The hardness of the produced hoof horn is almost inversely proportional to the moistness of the horn and is also influenced by the content of intracellular lipids. The segment specific variations in the hardness and moistness of the horn are described. In all segments, cornification of the cells of the tubular medulla is incomplete and, therefore, a predilection site for bacterial colonization of the hoof horn exists.

**Keywords:** horse hoof, keratinization, cornification, horn quality, keratinfilaments, keratin-filament associated proteins

## Einleitung

Die Struktur und somit die Qualität des Hufhornes wird durch komplexe Differenzierungsprozesse der verhornenden Epidermiszellen bestimmt, die mit der Bildung „toter“ Hornzellen enden. Diese strukturellen Einflussfaktoren auf die Hornqualität können in drei Gruppen unterteilt werden: Architektur des Hornzellverbandes, intrazelluläre Faktoren und interzelluläre Faktoren (Mülling, 1993; Pellmann et al., 1993). Während die Architektur des Hornes im ersten Teil erläutert wurde, sollen in dieser Arbeit die Auswirkungen intra- und interzellulärer Differenzierungsprozesse auf die Hornqualität dargestellt werden.

Zu den morphologischen und biochemischen Veränderungen in den verhornenden Zellen gehören die Keratinsynthese, der Aufbau intermediärfilamentassoziiierter Proteine (IFAP) und die Entstehung einer verstärkten Zellmembran (cornified envelope). Die Keratinfilamente bilden in der Zelle ein Zytoskelett und verleihen ihr so Stabilität. Die IFAP binden an die Keratinfilamente und führen über diese Interaktion zur Bildung größerer Keratinfilamentbündel (Parry und Steinert, 1995). Auf diese Weise beeinflussen auch die IFAP die Stabilität der Hornzellen. Das cor-

nified envelope ist eine zum Ende der Differenzierung unterhalb der Plasmamembran aufgebaute Proteinhülle, die als die chemisch widerstandsfähigste Struktur der Hornzellen angesehen wird (Sun und Green, 1976). Darüber hinaus kommt es zur Bildung von membrane coating granules (MCGs) und der Ausschleusung ihres Inhaltes, des membrane coating materials (MCM), das als Interzellularkitt die Hornzellen miteinander verbindet. Die wichtigste Funktion des Interzellularkittes ist die Sicherung des mechanischen Zusammenhaltes der Hornzellen (Budras und Bragulla, 1991). Lage, Form und Struktur der verhornenden Epidermiszellen ändern sich mit zunehmender Differenzierung (Bragulla, 1996), so dass die Epidermis in mehrere Schichten unterteilt werden kann. Dem Stratum basale, dessen Zellen allein zur mitotischen Teilung fähig sind, folgt das Stratum spinosum, in dem die Zellen, ebenso wie in dem, ausschließlich im Zuge der weichen Verhornung auftretenden, Stratum granulosum den spezifischen Differenzierungsprozess durchlaufen. Das abschließende Stratum corneum wird von den vollständig verhornten Zellen gebildet.

## Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurden jeweils sechs Proben aus dem rechten Vorderhuf von 25 Pferden im Alter zwischen drei und fünfzehn Jahren entnommen. Es wurden nur regelmäßige Hufe verwendet, die makroskopisch keine Anzeichen einer pathologischen Veränderung aufwiesen. Mit einer Tischbandsäge wurde etwa 5 mm beidseits der Medianen der Huf vollständig durchgesägt und so eine Sagittalscheibe von ca. 1 cm Dicke entnommen. Die laterale Hälfte des Hufes wurde ebenfalls in 1 cm dicke Sagittalscheiben zersägt. Aus diesen Scheiben wurden Probenblöckchen herausgearbeitet, die alle Epidermis, Corium und, sofern ausgebildet, Subcutis umfassten. Die Probenentnahmestellen lagen median im Sohlenzentrum, in der Strahlspitze, in der mittleren Strahlfurche, im lateralen Ballenwulst, in der lateralen seitlichen Strahlfurche und im lateralen Sohlenschenkel (s. Abb. 1 im Teil 1 dieser Untersuchung). Für die lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden die fixierten und aufbereiteten Proben einer Hämatoxylin/Eosin (HE)-Färbung, einer Perjodsäure-Schiff-Reaktion (PAS), einer Sudanschwarz B-Färbung sowie einem semiquantitativen Nachweis der Sulfhydryl (SS)- und Disulfid (SH)-Gruppen unterzogen. Darüber hinaus wurden Präparate für transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen (TEM) angefertigt. Die Hornhärte und -feuchtigkeit wurden gemessen. Eine detaillierte Beschreibung der Probenaufbereitung und der angewandten Untersuchungsmethoden findet sich in der Dissertation von Frohnes (1999).

## Ergebnisse

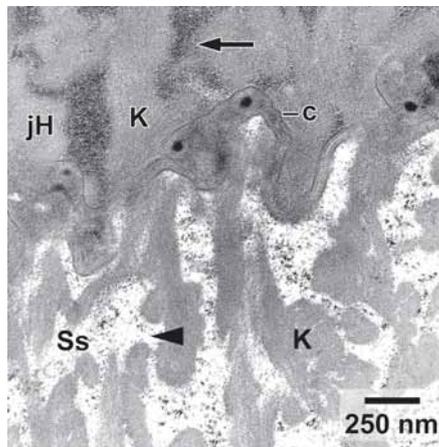
### Intrazelluläre Faktoren

Die Struktur und Qualität der Hornzelle wird entscheidend beeinflusst durch die Art und Menge der während der Differenzierung der Epidermiszellen synthetisierten Keratinproteine und der intermediärfilamentassoziierten Proteine (IFAP) sowie durch deren Vernetzungsgrad über Disulfidbrücken. Darüber hinaus gehören auch das cornified envelope und der Gehalt an Fetttropfen zu den intrazellulären Faktoren, die Einfluss auf die Hornqualität nehmen.

Die licht- und transmissionselektronenmikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass die Menge der Keratinproteine in den Epidermiszellen vom Stratum basale bis zur Verhornungsgrenze hin in allen untersuchten Segmenten mit fortschreitender Differenzierung kontinuierlich zunimmt. Dabei ist im Ballen ein insgesamt etwas geringerer Keratingehalt zu beobachten als in Sohle und Strahl. Die Keratinfilamentbündel bilden in der verhornenden Zelle ein dreidimensionales Netzwerk, mit überwiegender Ausrichtung parallel zur Verhornungsgrenze. Am Übergang zum Stratum corneum flachen die Zellen in allen untersuchten Segmenten deutlich ab, die Keratinfilamentbündel füllen die jungen Hornzellen fast vollständig aus (Abb. 1).

Ab dem mittleren Drittel des Stratum spinosum finden sich in Sohle und Strahl an den Rändern der Keratinfilamentbündel und im geringeren Ausmaß auch innerhalb der Bündel IFAP, die sich im transmissionselektronenmikroskopischen Bild als kleine

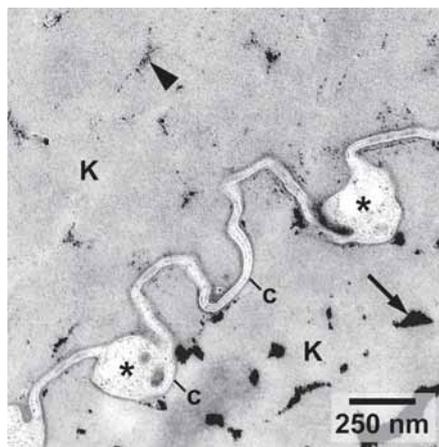
globuläre, elektronendichte Strukturen darstellen. Ihre Menge steigt ebenfalls zum Stratum corneum hin deutlich an (Abb. 1).



**Abb. 1:** TEM-Aufnahme von der Verhornungsgrenze: In der Zelle der obersten Zelle des Stratum spinosum (Ss) finden sich zwischen den Keratinfilamentbündeln (K) weite Räume, die fein- bis mittelgrobkörniges Material mittlerer bis hoher Elektronendichte enthalten (Pfeilkopf). In der jungen Hornzelle (jH) füllt Ifap die Räume zwischen den Keratinfilamentbündeln vollständig aus (Pfeil). Innen an die Plasmamembran der jungen Hornzelle ist das cornified envelope (c) als kontinuierliches marginales Band hoher Elektronendichte angelagert.

*Transmission electron micrograph of the border of cornification: Within the cell of the upper layer of the Stratum spinosum (Ss) there are wide cavities between the keratinfilament bundles (K) containing fine to middle coarse granular material of medium to high electron density - Ifap (arrowhead). Within the young horn cell (jH) Ifap totally fills the spaces between the keratinfilament bundles (arrow). A cornified envelope (c) is deposited along the inner plasma membrane of the young horn cell as a continuous marginal band of high electron density.*

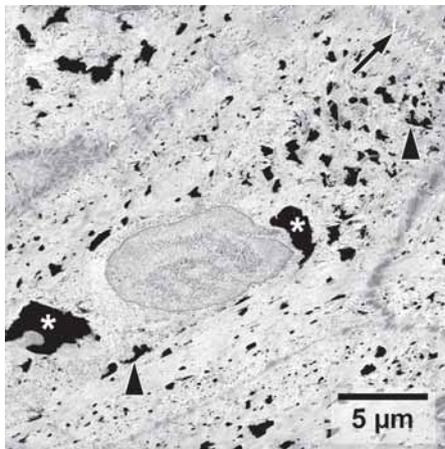
In den jungen Hornzellen werden die schmalen Räume zwischen den Keratinfilamentbündeln fast vollständig von IFAP ausgefüllt (Abb. 2). Mit zunehmender Reifung der jungen Hornzellen wird der Anteil dieses Materials geringer, nach wenigen Zelllagen erscheinen die ausgereiften Hornzellen homogen.



**Abb. 2:** TEM-Aufnahme vom Modus der harten Verhornung: Ifap (Pfeile) ist zwischen den Keratinfilamentbündeln (K) fein verteilt. Der Interzellulärspace weist selten blasige Erweiterungen auf (Stern). c: cornified envelope.

*Transmission electron micrograph of the mode of hard type of cornification: Ifap (arrows) in fine distribution between the keratinfilament bundles (K). The intercellular fissure shows occasional bullous dilations (asterisk). c: cornified envelope.*

Im Ballen finden sich keine IFAP im Stratum spinosum. Hier durchlaufen die verhornenden Zellen ein für die weiche Verhornung typisches Stratum granulosum, das durch das Auftreten unregelmäßig geformter, stark basophiler (HE-Färbung) bzw. sehr elektronendichter (TEM) Keratohyalin granula charakterisiert ist (Abb. 3). Sie stellen die Speicherform der IFAP dar. Die Zahl und Größe der Keratohyalin granula steigt mit zunehmender Differenzierung der Zellen schnell an, so dass die Zellen im oberen Stratum granulosum eine große Menge sehr unregelmäßig geformter Granula enthalten. Kurz vor der Verhornungsgrenze wird der Rand der Granula unregelmäßig, das Material der Keratohyalin granula scheint sich abzulösen und zu verteilen. In den Hornzellen sind keine Keratohyalin granula mehr zu erkennen.



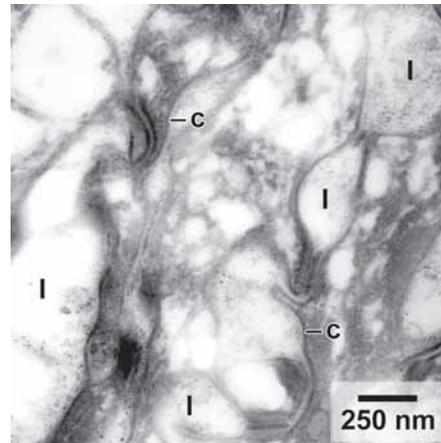
**Abb. 3:** TEM-Aufnahme vom Modus der weichen Verhornung: Zellen des Stratum granulosum enthalten unregelmäßig geformte Keratohyalin granula (Pfeilköpfe), die an den Polen des Zellkerns besonders groß sind (Sterne). Der Interzellularraum verläuft stark geschlängelt (Pfeil).

*Transmission electron micrograph of the mode of soft type of cornification: Cells of the Stratum granulosum contain irregular formed keratohyalin granula (arrowhead), which are particularly large at the pole of the cell nucleus (asterisks). The intercellular space is tightly wound (arrow).*

Der semiquantitative Nachweis der SH- und SS-Gruppen ergibt folgende Befunde: Mit steigender Anzahl der Keratinfilamente nimmt auch die Menge vor allem der SH-Gruppen segmentübergreifend zur Verhornungsgrenze hin zu. Die Anzahl der SS-Gruppen steigt in allen untersuchten Segmenten am Übergang zum Stratum corneum deutlich an und nimmt mit Reifung der Hornzellen nochmals zu. Dabei ist die Menge der nachgewiesenen SS-Gruppen im Sohlenhorn größer als in den Hornzellen des Ballen-Strahlsegmentes. SH-Gruppen sind in den Hornzellen vor allem in der Zellperipherie nachzuweisen.

In allen untersuchten Segmenten finden sich in den suprapapillär angeordneten Zellen deutlich weniger Keratinfilamentbündel und IFAP als in den peri- und interpapillären Epidermiszellen (Abb. 4). Die Zellen flachen am Übergang zum Stratum corneum kaum ab, die Keratinfilamentbündel bilden auch in den Hornzellen des Röhrchenmarks ein grobmaschiges Netzwerk. Während der Nachweis der SH-Gruppen in den verhornenden Zellen segmentübergreifend nur geringgradig schwächer ausfällt, ist der Gehalt an SS-Gruppen im Röhrchenmark

deutlich geringer als in der Röhrchenrinde oder im Zwischenröhrchenhorn.

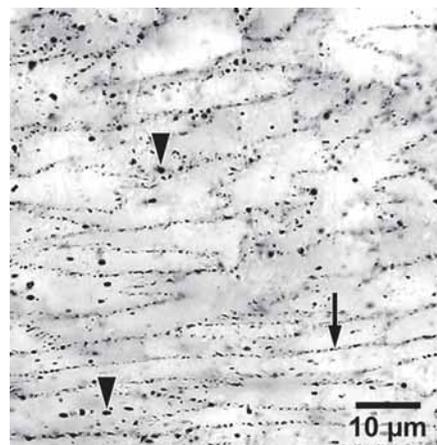


**Abb. 4:** TEM-Aufnahme vom Röhrchenmark: Typisch ist die lockere Struktur der Zellen des Röhrchenmarks. c: cornified envelope, I: Interzellularraum

*Transmission electron micrograph of the horn tubule medulla: Typical is the loosely-arranged structure of the cells of the tubular medulla. c: cornified envelope; I: intercellular space.*

Die transmissionselektronenmikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass in Sohle und Strahl in den obersten ein bis zwei Zelllagen des Stratum spinosum, im Ballen in den obersten Zelllagen des Stratum granulosum, innen an die Zellmembran ein schmales Band mittlerer bis hoher Elektronendichte angelagert wird (Abb. 4). Dieses marginale Band oder cornified envelope ist im Stratum spinosum bzw. granulosum in unregelmäßigen Abständen unterbrochen, erst im Stratum corneum umgibt es die Hornzellen aller Segmente als durchgehendes, elektronendichtes Band. Unterschiede zwischen Röhrchenmark, Röhrchenrinde und Zwischenröhrchenhorn bestehen nicht.

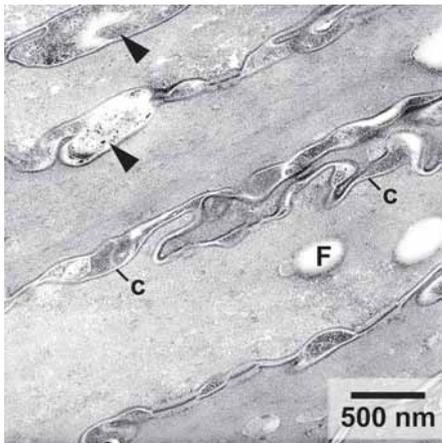
Der Gehalt an intrazellulären Lipiden variiert in den untersuchten Segmenten des Pferdehufes erheblich (Abb. 5). Während in



**Abb. 5:** Lichtmikroskopischer Lipidnachweis durch Sudanschwarz-B-Färbung: Die fettthaltigen Substanzen im Interzellularkitt liegen perlchnurartig nebeneinander (Pfeile). Im Zytoplasma der Zellen kommen größere Fetttropfchen vor (Pfeilköpfe).

*Light microscopical detection of lipids with Sudanblack-B staining: There are substances in the intercellular cement containing lipids that lie bead-like side by side (arrow). Within the cytoplasm of the cells there can be considerably large lipid droplets (arrowheads).*

der Sohlenepidermis Fetttröpfchen nur vereinzelt vorkommen, sind in den verhornenden und verhornten Zellen des Strahls und insbesondere des Ballens erheblich größere Mengen intrazellulärer Fetttröpfchen zu beobachten. Die Lipide finden sich vor allem in der Nähe des Zellkerns und der Zellmembran (Abb. 6). Vor allem in der Sohle sinkt ihre Zahl in den peri- und interpapillär angeordneten verhornenden Zellen mit fortschreitender Differenzierung, so dass in den Hornzellen nur vereinzelt Fetttröpfchen auftreten. Segmentübergreifend finden sich in den suprapapillären Zellen deutlich mehr Fetttropfen, die auch in den Hornzellen noch vorhanden sind.



**Abb. 6:** TEM-Aufnahme von lipidhaltigen Zellen: Im Zytoplasma finden sich Fetttropfen, deren Inhalt herausgelöst ist (F). Der Interzellularraum ist durch zahlreiche blasige Erweiterungen, die nur teilweise mit Interzellularkitt angefüllt sind, verbreitert (Pfeilköpfe). c: cornified envelope

*Transmission electron micrograph of lipid-containing cells: Within the cytoplasm, there are lipid droplets (F), the content of which is dissolved. The intercellular space is enlarged by several bulbous dilations (arrowhead), of which only a few are filled with intercellular cement.*

#### Interzelluläre Faktoren

Der Interzellularkitt wird im Golgi-Apparat und dem rauen Endoplasmatischen Retikulum der Spinosazellen synthetisiert und in den MCGs (membrane coating granules) zur Zellperipherie transportiert, wo er durch Exozytose in den Interzellularraum gelangt. In den untersuchten Segmenten des Pferdehufes bestehen segmentspezifische Besonderheiten bezüglich des ersten Auftretens und der Ausschleusung der MCGs. Während in Sohle und Strahl die MCGs im mittleren Drittel des Stratum spinosum zu beobachten sind, finden sie sich im Ballen erst im oberen Drittel. Nach der Ausschleusung der MCGs fällt die PAS-Reaktion, ein histochemischer Nachweis für Kohlenhydrate, im Interzellularraum positiv aus. Im Horn werden durch die Sudan-schwarz B-Färbung die im Interzellularkitt enthaltenen Lipide als perlschnurartig aufgereichte schwarze Punkte im Interzellularraum aller Segmente sichtbar.

Der Interzellularraum verläuft an den Längsseiten der Hornzellen leicht geschlängelt, an den Stirnseiten der Zellen ist er aufgrund der starken Verzahnung der Zellen ineinander stark gewunden. Im Zwischenröhrenhorn und den Röhrenrinden des Sohlenhorns ist der Interzellularraum gleichmäßig eng und nur gelegentlich durch blasige Erweiterungen verbreitert. In den

entsprechenden Abschnitten des Strahl- und Ballenhorns ist der Interzellularraum durch zahlreiche großblasige Erweiterungen verbreitert, die im Ballenhorn nur teilweise mit Interzellularkitt gefüllt sind. Im Röhrenmark ist der Interzellularraum segmentübergreifend häufiger durch großblasige Erweiterungen verbreitert als dies in der Röhrenrinde und dem Zwischenröhrenhorn der Fall ist. Die Erweiterungen sind nur teilweise mit Interzellularkitt gefüllt.

Die Ergebnisse der Feuchtigkeits- und Härtemessungen sind in den Tabellen 1 und 2 aufgelistet. Die Hornhärte ist in Shore-Einheiten angegeben (100 Shore-Einheiten = max., 0 Shore-Einheiten = min.). Die Ergebnisse der Feuchtigkeitsbestimmung werden als prozentualer Wasseranteil am Feuchtgewicht angegeben.

**Tab. 1:** Ergebnisse der Härtemessung. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte von den an jedem Messpunkt durchgeführten drei Messungen.

*Results of hardness measurement: Mean values of the three separate measurements in each location*

	Härte des Sohlenhorns in Shore-Einheiten	Härte des Strahlhorns in Shore-Einheiten	Härte des Ballenhorns in Shore-Einheiten
Huf 9	63,67	36,67	31,00
Huf 10	59,00	38,33	6*
Huf 11	45,00	37,33	33,33
Huf 12	53,33	39,33	34,00
Huf 13	61,67	43,33	33,00
Huf 14	62,33	32,67	6*
Huf 15	53,33	40,33	30,00
Huf 16	48,67	42,67	38,33
Huf 17	68,67	37,00	32,00
Huf 18	54,00	30,67	30,33
Huf 19	61,67	34,00	24,00
Huf 20	52,00	31,00	22,67
Huf 21	68,00	36,33	20,33
Mittelwert	57,80	36,90	29,91

\*: Die entnommenen Proben waren für exakte Messungen zu dünn.

#### Diskussion

Die Hornqualität, also das Zusammenspiel intra- und interzellulärer Faktoren sowie der Architektur des Hornzellverbandes, unterscheidet sich in den untersuchten Segmenten des Pferdehufes aufgrund der unterschiedlichen funktionellen Anforderungen an das Horn in diesen Segmenten. Aus diesem Grund darf

die Hornqualität nicht mit der Hornhärte gleichgesetzt werden. Horn guter Qualität kann in Adaptation an die unterschiedlichen funktionellen Anforderungen in den einzelnen Segmenten des Pferdehufes seine Schutzfunktion gegenüber mechanischen, chemischen und mikrobiellen Noxen voll erfüllen. Horn schlechter Qualität kann diese Funktionen nicht mehr erfüllen und stellt damit eine strukturelle Schwachstelle und eine Prädilektionsstelle für Erkrankungen dar.

**Tab. 2:** Ergebnisse der Feuchtmessung.

*Results of humidity measurements*

	Feuchtigkeitsgehalt des Sohlenhornes in %	Feuchtigkeitsgehalt des Strahlhornes in %	Feuchtigkeitsgehalt des Ballenhornes in %
Huf 9	37,50	28,73	61,09
Huf 10	32,15	39,72	43,13
Huf 11	36,59	36,57	38,06
Huf 12	28,55	30,16	41,25
Huf 13	27,70	32,40	20,97
Huf 14	29,66	41,18	52,69
Huf 15	25,23	30,55	36,38
Huf 16	24,50	21,77	21,79
Huf 17	33,22	42,72	41,03
Huf 18	33,18	38,75	37,95
Huf 19	30,62	43,31	35,50
Huf 20	32,95	33,75	43,08
Huf 21	29,97	30,14	29,43
Mittelwert	30,91	34,60	38,64

Das Sohlenhorn ist mit einer Härte von 57,80 Shore-Einheiten als hartes Horn einzustufen. Die Keratinfilamente und die IFAP werden über eine große Anzahl Disulfidbrücken stabilisiert und füllen die Zellen fast vollständig aus. Die Zytoarchitektur der Hornzellen ist daher solide. Der Interzellularraum ist bis auf wenige blasige Erweiterungen vollständig mit Interzellularkitt gefüllt. Nach *Budras und Huskamp (1995)* ist eine hohe Stabilität des Hornzellverbandes dann gegeben, wenn der Interzellularraum möglichst gleichmäßig eng ist, die Kontaktfläche der Hornzellen mit dem Kitt möglichst groß und der Interzellularraum vollständig mit Kitt ausgefüllt ist. Diese Anforderungen sind im Sohlenhorn weitgehend erfüllt.

Das Strahl- und Ballenhorn besitzt eine weich-elastische, rädiergummiartige Konsistenz. Obwohl das Strahlhorn nach dem Modus der harten und das Ballenhorn nach dem Prinzip der weichen Verhornung gebildet wird, finden sich in beiden Abschnitten des Ballen-Strahlsegmentes Gemeinsamkeiten, mit denen sie sich von dem harten Sohlenhorn unterscheiden. Die-

se Merkmale sind in der Regel im Ballenhorn, dessen Härte geringer ist als die des Strahlhornes, deutlicher ausgeprägt. Der Keratinfilament-IFAP-Komplex füllt die Hornzellen zwar fast vollständig aus, wird aber durch weniger Disulfidbrücken stabilisiert als im Sohlensegment. Intrazellulär finden sich im Strahl- und Ballenhorn viele Lipidtröpfchen. Eine mögliche funktionelle Bedeutung dieser intrazellulären Lipidtröpfchen ist die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften der Hornzelle. Die Ergebnisse der Härte- und Feuchtigkeitsmessungen zeigen, dass die Hornhärte mit sinkendem Feuchtigkeitsgehalt des Hornes zunimmt. So ist das Sohlenhorn um 20 Shore-Einheiten härter als das Strahlhorn. Der Feuchtigkeitsgehalt im Strahlhorn ist nur etwa 4% höher als im Sohlenhorn. Die deutlich geringere Hornhärte im Strahl gegenüber der Härte des Sohlenhornes lässt sich daher nicht allein durch den geringfügig höheren Feuchtigkeitsgehalt des Strahlhornes erklären, da sich Strahl- und Ballenhorn auch um etwa 4% im Feuchtigkeitsgehalt unterscheiden, das Strahlhorn aber nur etwa 7 Shore-Einheiten härter als das Ballenhorn ist. Die deutlich geringere Hornhärte im Strahl- und Ballensegment sowie die ausgeprägte Elastizität des Hornes sind daher neben dem höheren Wasseranteil in erster Linie auf den hohen Anteil intrazellulärer Lipidtröpfchen zurückzuführen, die in der Zelle als elastizitätsgebender Faktor fungieren. Der Interzellularraum ist häufig durch großblasige Erweiterungen verbreitert, die im Ballenhorn nur teilweise mit Interzellularkitt gefüllt sind. Die mechanische Stabilität des Hornzellverbandes ist daher im Ballen geringer als in Sohle und Strahl. *Mülling (1993)* vergleicht die großblasigen Erweiterungen des Interzellularraumes mit einem Wasserkissen, das die Druckkräfte zwischen den Zellen verteilt. In Übereinstimmung mit dieser Theorie ist die funktionelle Bedeutung dieser zahlreichen Erweiterungen in einer elastischen Dämpfung auftretender Druckbelastungen zu sehen und als eine weitere Ursache der weich-elastischen Hornkonsistenz einzustufen.

Die Zellen des Röhrenmarks verhornen sowohl im Sohlen- als auch im Ballen-Strahlsegment nur unvollständig. Die Ursache dieser unvollständigen Verhornung ist in Übereinstimmung mit den Angaben mehrerer Autoren (*Budras und Schiel, 1996; Mülling, 1993; Mülling et al., 1994*) in der raschen Entfernung der suprapapillär angeordneten Epidermiszellen von der ernährenden Lederhautoberfläche zu sehen. Da die Epidermis gefäßlos ist, sind die Epidermiszellen auf die Diffusion von Nährstoffen aus den Gefäßen der Lederhaut angewiesen. Die Versorgung der Zellen ist dabei nach dem *Fick'schen* Diffusionsgesetz neben dem Konzentrationsgradienten in erster Linie von der Länge der Diffusionsstrecke und der Größe der Lederhautoberfläche abhängig. Im Zuge der terminalen Differenzierung entfernen sich die Zellen rasch von der kleinen suprapapillären Lederhautoberfläche, so dass die Diffusionsstrecke sehr lang und damit die Versorgungslage der Zellen kritisch wird. Die Folge ist eine unvollständige, überstürzte Verhornung, während der nur geringe Mengen an Keratinfilamenten und IFAP synthetisiert werden, die nur über wenige Disulfidbrücken vernetzt sind. Neben der geringen Stabilität der Hornzellen selbst ist auch der interzelluläre Zusammenhalt im Röhrenmark als unzureichend einzustufen, da der, in großer Menge synthetisierte, Interzellularkitt den Interzellularraum zwischen den Hornzellen nur unvollständig ausfüllt. Zudem ist die Oberfläche der Hornzellen

im Gegensatz zu der der Zellen in der Röhrenrinde und des Zwischenröhrenhornes glatt. Das Zusammenspiel dieser Faktoren führt zu einem schnellen Zerfall der Hornzellen, so dass die Hornröhren in den distalen Abschnitten nur noch mit Zellbruchstücken angefüllt oder leer sind. Durch die schlechte Hornqualität ist das Röhrenmark für eine chemische Zersetzung durch Bestandteile des Mistes und der Boxeneinstreu sehr anfällig und stellt damit eine ideale Eintrittspforte für eine bakterielle Besiedlung des Hornes dar.

## Literatur

- Bragulla, H. (1996): Zur fetalen Entwicklung des Pferdehufes. Berlin, Freie Univ., Fachber. Veterinärmed., Habil.-Schr.
- Budras, K.-D. und H. Bragulla (1991): Besonderheiten des Membrane Coating Materials (MCM; Kittsubstanz zwischen Keratinozyten) im harten Horn des Pferdehufes. *Anat. Anz. (Suppl.)* 170, 435–436
- Budras, K.-D. und B. Huskamp (1995): Die Hornqualität des Pferdehufes und deren Verbesserung nach einer orthopädischen Behandlung der Hufrehe. In: Knezevic, P. F. (Hrsg.): *Orthopädie bei Huf- und Klauentieren*. Stuttgart, Schattauer Verlag, S. 252–268
- Budras, K.-D. und Ch. Schiel (1996): A comparison of horn quality of the white line in the domestic horse (*Equus caballus*) and the przewalski horse (*Equus przewalskii*). *Pferdeheilkunde* 12, 641–645
- Frohnes, A.-K. (1999): Struktur, Verhornung und Hornqualität im Sohlen- und Ballen-Strahlsegment des Pferdehufes. Berlin, Freie Univ., Fachber. Veterinärmed., Diss.
- Mülling, C. (1993): Struktur, Verhornung und Hornqualität in Ballen, Sohle und Weisser Linie der Rinderklaue und ihre Bedeutung für Klauenerkrankungen. Berlin, Freie Univ., Fachber. Veterinärmed., Diss.
- Mülling, Ch., H. Bragulla und K.-D. Budras (1997): Verhornungsstörungen der Klauenepidermis begünstigen ihre bakterielle Infektion. Vortragsband des 22. Kongresses der Deutschen Veterinärmedizinischen Gesellschaft, 8.-11. April 1997, Bad Nauheim, S. 438–445
- Parry, D.A.D. und P.M. Steinert (1995): Molecular biology intelligence unit. Intermediate filament structure. Heidelberg, Springer Verlag, S. 9–144
- Pellmann, R., S. Reese und H. Bragulla (1993): Wechselwirkungen zwischen Hornstruktur und Hornqualität am Pferdehuf als Grundlage für das Verständnis von Verhornungsstörungen. *Monatsh. Vetmed.* 48, 623–630
- Sun, T.-T. und H. Green (1976): Differentiation of the epidermal keratinocyte in cell culture: Formation of the cornified envelope. *Cell* 9, 511–521

Dr. Anne-Katrin Frohnes

Tierklinik Hochmoor  
Von-Braun-Straße 10  
48712 Gescher-Hochmoor

Tel. 02863/20990  
Fax. 02863/209920