

Segmentspezifitäten am Pferdehuf - Teil II: Zusammenhang zwischen Hornstruktur und mechanisch-physikalischen Horneigenschaften in den verschiedenen Hufsegmenten

Bianca Patan¹ und Klaus-Dieter Budras²

Klinik für Orthopädie bei Huf- und Klautentieren der Veterinärmedizinischen Universität Wien¹ und Institut für Veterinär-Anatomie, Fachbereich Veterinärmedizin der Freien Universität Berlin²

Zusammenfassung

Als objektivierbare Kriterien zur Beurteilung der Hornqualität in den einzelnen Segmenten des Pferdehufes wurden verschiedene mechanisch-physikalische Materialeigenschaften des Hufhornes wie die Wasseraufnahmekapazität, die Geschwindigkeit von Wasseraufnahme und -abgabe sowie die in Abhängigkeit vom Wassergehalt variierende Hornhärte bestimmt. Dabei konnten nicht nur erhebliche segmentspezifische Unterschiede, sondern – beispielsweise im Kronhorn – auch deutliche Variationen innerhalb eines Segmentes festgestellt werden. Die größten Differenzen hinsichtlich der untersuchten Materialeigenschaften weisen das Saumhorn und das äußere Kronhorn auf, obwohl die Bildung dieser Hornmassen in direkter Nachbarschaft erfolgt. So besitzt das sehr weiche Saumhorn bei einer hohen Wasseraufnahmegeschwindigkeit die größte Wasseraufnahmekapazität. Aufgrund der verhältnismäßig schnellen Wasserabgabe ist die Wasserspeicherfähigkeit des Saumhornes allerdings nur gering ausgeprägt. Das sehr harte äußere Kronhorn ist dagegen durch eine geringe Wasseraufnahmekapazität gekennzeichnet. Da die Wasserabgabe an die Umgebung jedoch relativ langsam erfolgt, resultiert insgesamt ein beachtlicher Speichereffekt. Das Horn im Ballen-Strahlsegment nimmt insofern eine Sonderstellung ein, als es durch seine verhältnismäßig hohe Wasseraufnahmekapazität und die relativ langsame Wasserabgabe insgesamt die höchste Wasserspeicherfähigkeit aufweist. Die dargelegten mechanisch-physikalischen Materialeigenschaften des Hufhornes werden maßgeblich von der Hornstruktur beeinflusst.

Schlüsselwörter: Hufhorn, Hornqualität, Hornhärte, Wassergehalt, Pferd

Segment-specificity of the equine hoof- Part 2: Correlation of horn structure and mechanical-physical horn properties in the different segments of the hoof

As objectifiable criteria for assessment of horn quality in the different segments of the equine hoof, diverse mechanical-physical material properties of the hoof horn, such as water uptake capacity, water uptake and water release rate as well as the water-content-dependent horn hardness, were measured. Thus, distinct segment specific differences and conspicuous intra-segment variations, e.g., in the coronary horn, were detected. Regarding the tested material properties, perioplic and outer coronary horn display the greatest differences, even though the production of these horn masses occurs in close proximity. The soft perioplic horn shows the highest water uptake capacity along with a high water uptake rate. Because of its comparatively fast water release, the water storage capacity of the perioplic horn is low. The very hard outer coronary horn, in turn, is characterised by a low water uptake capacity. As the water release into the vicinity occurs comparatively slow, the resulting water storage effect is considerable. The horn of the bulb and frog takes on an exceptional position because due to its relatively high water uptake capacity and low water release rate, this horn displays the highest water storage capacity altogether. The mechanical-physical horn properties and the horn quality are considerably influenced by the horn structure.

Keywords: hoof horn, horn quality, horn hardness, moisture content, horse

Einleitung

Bei der Fußung des Pferdehufes treten enorme Kräfte auf, die durch den komplizierten Bau des Zehenendorganes abgefangen und gedämpft werden. Eine bedeutende Rolle spielt der Hufbeinträger (Budras und Huskamp 1999), eine Vorrichtung zur Aufhängung des Hufbeins in der Hufkapsel. Durch diese strukturelle Besonderheit des Hufes wird die auf das Hufbein einwirkende Druckkraft der Körperlast in eine Zugkraft umgewandelt, um in der Hufplatte wieder in eine Druckkraft zurückgewandelt zu werden. Der Zug des Hufbeinträgers ist auch für die Auslösung des Hufmechanismus mitverantwort-

lich, der ein federnd-elastisches Auffußen gewährleistet. Diese komplexe Biomechanik des Hufes ist jedoch nur dadurch möglich, dass die Eigenschaften des Hufhornes an die unterschiedlichen mechanischen Anforderungen, die an das Horn der Hufkapsel beim Fußten gestellt werden, angepasst sind. Infolgedessen müssen die Horneigenschaften (wie Härte und Elastizität) in den einzelnen Hufsegmenten variieren. Die Summe der Horneigenschaften und deren Adaptationsvermögen an die jeweiligen segmentspezifischen funktionellen Anforderungen ergeben die Hornqualität.

Zur Objektivierung der Qualitätsunterschiede in den einzelnen Hufsegmenten können verschiedene Materialprüfungs-

methoden angewendet werden. Dabei ist nach *Naumann et al.* (1987) sowie *Mülling* (1993) und *Pellmann et al.* (1993) der Härtemessung die größte Bedeutung beizumessen, da mit diesem mechanisch-physikalische Prüfverfahren die physiologische Belastung der Hufkapsel bei der Fußung am ehesten imitiert wird. Das gilt mit Ausnahme des überwiegend zugbelasteten Wandhornes mehr oder weniger deutlich für das Horn aller übrigen Segmente, die bei der Fußung unterschiedlichen Druckbelastungen ausgesetzt werden. Da die mechanischen Eigenschaften wesentlich vom Wassergehalt des Hufhornes beeinflusst werden (*Hinterhofer et al.* 1998), spielen auch die Wasseraufnahmekapazität und die Wasserspeicherfähigkeit des Hornes eine Rolle für die Beurteilung der Hornqualität.

Ziel der Untersuchung war es, Zusammenhänge zwischen den segmentspezifischen strukturellen Besonderheiten (*Budras und Patan* 2003) und den mechanisch-physikalischen Materialeigenschaften des Hufhornes darzustellen. Dadurch soll eine Grundlage für das bessere Verstehen pathologischer Vorgänge und klinischer Heilungsabläufe geschaffen werden.

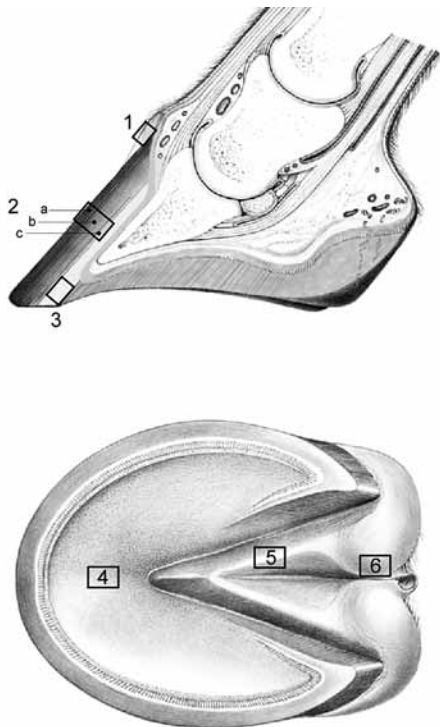


Abb 1: Probeentnahmestellen für die Untersuchung der mechanisch-physikalischen Materialeigenschaften des Hufhornes verschiedener Segmente. 1 = Saumhorn, 2 = Kronhorn (a = äußeres Kronhorn, b = mittleres Kronhorn, c = inneres Kronhorn); 3 = Horn der weißen Linie, 4 = Sohlenhorn, 5 = Strahlhorn, 6 = Ballenhorn
Sample sites for examination of the mechanical-physical material properties of the hoof horn in the different segments. 1 = periopic horn, 2= coronary horn (a = outer coronary horn, b = middle coronary horn, c = inner coronary horn), 3 = horn of the white line, 4 = solear horn, 5 = horn of the frog, 6 = bulbar horn

Um Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen zur Verbesserung von Prophylaxe und Therapie von Hufkrankungen zu liefern, liegt ein besonderes Augenmerk auf der Darstellung von Prädilektionsstellen für derartige Erkrankungen. Darüber hinaus sollen Vorschläge zur Verbesserung der Hornqualität durch geeignete Hufpflegemaßnahmen unterbreitet werden.

Material und Methoden

Die Probeentnahme erfolgte aus dem linken Vorderhuf von fünf Warmblutpferden im Alter zwischen 3 und 15 Jahren. Dabei wurde ausschließlich Untersuchungsmaterial von solchen Hufen verwendet, die bei der makroskopischen Voruntersuchung keinerlei Anzeichen von pathologischen Veränderungen aufwiesen. Die Hufe wurden unmittelbar nach der Schlachtung der Tiere gewonnen, zum Transport eingefroren und bis zur weiteren Verarbeitung bei -22°C tiefgefroren gelagert. Um Feuchtigkeitsverlust zu vermeiden, erfolgte die Lagerung in luftdicht verschlossenen Plastiksäcken.

Für die Probengewinnung wurden die Hufe zunächst mittels einer Tischbandsäge halbiert. Anschließend wurde an der lateralen Hälfte ca. 2 cm parallel zur Medianen ein weiterer Sagittalschnitt durchgeführt. Aus dieser Sagittalscheibe wurden an den in Abb. 1 markierten Lokalisationen von jedem Huf insgesamt acht Hornproben entnommen, wobei alle verschiedenen Hufsegmente berücksichtigt wurden.

Direkt nach der Probeentnahme wurden die Hornblöckchen auf einer Feinanalysewaage gewogen und anschließend zur Bestimmung des minimalen Wassergehaltes bei Raumtemperatur bis zur Gewichtskonstanz (4 Wochen) getrocknet. Zur Untersuchung des maximalen Wassergehaltes und somit der Wasseraufnahmekapazität wurden die Proben anschließend bis zur Gewichtskonstanz (14 Tage) bei 4°C in Wasser gelagert. Um die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme zu ermitteln, wurden die Hornproben dabei in bestimmten Zeitintervallen (Tab. 3) gewogen. Anschließend wurden die Proben erneut bei Raumtemperatur getrocknet und zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Wasserabgabe wiederum nach bestimmten Zeitintervallen (Tab. 4) gewogen. Abschließend wurde das Horn im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz (3 Tage) getrocknet. Die Feuchtigkeitsparameter wurden nach folgenden Formeln berechnet:

$$\text{physiologischer Wassergehalt [\%]} = \frac{A - \text{HTr}}{A} \times 100$$

$$\text{minimaler Wassergehalt [\%]} = \frac{\text{RTr} - \text{HTr}}{A} \times 100$$

$$\text{maximaler Wassergehalt [\%]} = \frac{\text{MaxF} - \text{HTr}}{\text{MaxF}} \times 100$$

$$\text{relative Wasseraufnahme [\%]} = \frac{\text{Wx} - \text{HTr}}{\text{Wx}} \times 100$$

$$\text{relative Wasserabgabe [\%]} = \frac{\text{Tx} - \text{HTr}}{\text{Tx}} \times 100$$

A = Ausgangsgewicht der Hornprobe direkt nach der Probeentnahme

HTr = Gewicht der Probe nach Hitzetrocknung bei 105°C

RTr = Gewicht der Probe nach Trocknung bei Raumtemperatur

MaxF = Gewicht der maximal feuchten Probe

Wx = Gewicht der für einen definierten Zeitintervall gewässerten Probe

Tx = Gewicht der im Anschluss an die Wässerung für einen definierten Zeitintervall bei Raumtemperatur getrockneten Probe

Die Bestimmung der Hornhärte erfolgte mit Hilfe eines SHORE C-Härteprüfgerätes, das den Widerstand eines Materials gegen das Eindringen eines stiftförmigen Eindringkörpers misst. Das Gerät ist geeicht und entspricht der amerikanischen Norm ASTM D 2240. Die Härte des Materials wird in SHORE-Einheiten von 0 bis 100 angegeben, wobei 100 SHORE-Einheiten einer maximal messbaren Härte entsprechen. Die Messung erfolgte jeweils an der natürlichen Hufoberfläche bzw. im mittleren und inneren Kronhorn sowie im Horn der weißen Linie an der zur Hufoberfläche parallelen Seite der Hornblöckchen. Dabei wurden in der Mitte der Messfläche jeweils drei aufeinanderfolgende Messungen vorgenommen und aus den Ergebnissen der Mittelwert berechnet. Zusätzlich zur Härtemessung bei physiologischem Wassergehalt (direkt nach der Probeentnahme) wurde außerdem die Härte des maximal feuchten Hornes sowie der getrockneten Hornproben gemessen.

Auf die Beschreibung der elektronenmikroskopischen Untersuchungsmethoden wird an dieser Stelle verzichtet, da sie ausführlich im 1. Teil der Arbeit (Budras und Patan 2003) erfolgte.

Ergebnisse

Wassergehalt und Härte des Hufhornes

Die mechanisch-physikalischen Materialeigenschaften der untersuchten Hornproben weisen zum Teil erhebliche segmentspezifische Unterschiede auf (Tab. 1 u. 2). Bei physiolo-

Hornprobe	Wassergehalt [%]		
	physiologisch	maximal	minimal
Saumhorn	48,00 ± 6,86	71,36 ± 1,84	6,82 ± 1,37
äuß. Kronh.	18,74 ± 0,62	27,37 ± 1,46	5,53 ± 0,46
mittl. Kronh.	21,74 ± 0,56	28,68 ± 1,06	5,36 ± 0,29
inn. Kronh.	30,00 ± 1,21	37,27 ± 0,54	5,38 ± 0,23
weiße Linie	26,76 ± 5,47	48,22 ± 1,71	5,86 ± 1,00
Sohlenhorn	27,58 ± 3,46	38,78 ± 1,15	6,63 ± 0,58
Strahlhorn	28,47 ± 3,25	51,44 ± 3,53	6,29 ± 0,71
Ballenhorn	38,70 ± 11,71	61,34 ± 4,88	8,36 ± 2,39

Tab 1: Feuchtigkeitsparameter im Hufhorn von Warmblutpferden (Mw ± SD; n = 5), angegeben als prozentualer Wasseranteil am jeweiligen Gesamtgewicht; physiologischer Wassergehalt: Messung direkt nach der Probeentnahme, maximaler Wassergehalt: Messung nach 14-tägiger Wässerung der Hornproben bei 4° C, minimaler Wassergehalt: Messung nach 4-wöchiger Trocknung der Hornproben unter Raumbedingungen

Humidity parameter of hoof horn of warm blooded horses (Mw ± SD; n = 5), in percentual water content of the respective total weight; physiological water content: measured directly after samples were taken, maximum water content: measured after watering the horn samples for 14 days at 4°C, minimal water content: measured at room temperature after a drying period of 4 weeks

gischem Wassergehalt ist das härteste Horn bei allen untersuchten Pferden in der äußeren und mittleren Kronhornzone zu finden, wobei die Härte durchschnittlich 95,40 ± 3,06 SHORE-Einheiten resp. 87,93 ± 1,53 SHORE-Einheiten

beträgt. Das Horn aus dem Saum- und dem Ballensegment besitzt hingegen mit durchschnittlich 31,17 ± 6,08 SHORE-Einheiten resp. 39,53 ± 12,14 SHORE-Einheiten die geringste Härte. Korrelierend dazu ist der physiologische Wassergehalt im äußeren und mittleren Kronhorn bei allen Pferden am geringsten (durchschnittlich 18,74 ± 0,62 % resp. 21,74 ± 0,56 %), wobei lediglich geringe individuelle Schwankungen festzustellen sind. Das weiche Horn im Saum- und Ballensegment, das in unmittelbarer Nähe zur äußeren behaarten Haut liegt, ist dagegen bei großer individueller Schwankungsbreite durch einen erheblich höheren Wasseranteil gekennzeichnet (durchschnittlich 48,00 ± 6,86 % resp. 38,70 ± 11,71 %). Weniger deutlich ist die Korrelation zwischen der Hornfeuchte und der Härte im Sohlen- und Strahlhorn sowie im Horn der weißen Linie, denn obwohl die Hornproben einen ähnlichen physiologischen Wassergehalt aufweisen, sind bezüglich der Härte erhebliche Unterschiede festzustellen. So ist das Sohlenhorn mit durchschnittlich 73,53 ± 9,70 SHORE-Einheiten wesentlich härter als die Hornproben aus dem Strahl und der weißen Linie, die eine Härte von durchschnittlich 56,33 ± 13,36 SHORE-Einheiten resp. 60,67 ± 11,62 SHORE-Einheiten besitzen.

Im maximal feuchten Zustand ist das Horn in allen Segmenten zwar insgesamt weicher als bei physiologischem Wassergehalt, segmentspezifische Härteunterschiede lassen sich jedoch ebenfalls feststellen (Tab. 2). Einschränkend muss erwähnt werden, dass eine Härtemessung des maximal feuchten Saumhornes nicht möglich war, da dieses Horn durch die Wässerung eine extrem weiche und schmierige Konsistenz erhielt. Auch die Unterschiede zwischen den Segmenten hinsichtlich des maximalen Wassergehaltes und somit der Wasseraufnahmekapazität des Hornes sind erheblich,

Hornprobe	Hornhärte [SHORE C-Einheiten]	
	bei physiologischem Wassergehalt	bei maximalem Wassergehalt
Saumhorn	31,17 ± 6,08	...#
äuß. Kronh.	95,40 ± 3,06	89,60 ± 0,96
mittl. Kronh.	87,93 ± 1,53	81,13 ± 2,00
inn. Kronh.	76,60 ± 3,12	71,93 ± 1,93
weiße Linie	60,67 ± 11,62	31,67 ± 7,16
Sohlenhorn	73,53 ± 9,70	74,27 ± 4,09
Strahlhorn	56,33 ± 13,36	36,47 ± 4,08
Ballenhorn	39,53 ± 12,14	29,20 ± 3,49

Tab 2: Härte des Hufhornes bei physiologischem bzw. maximalem Wassergehalt der Hornproben von Warmblutpferden (Mw ± SD; n = 5) # Am Saumhorn war eine Härtemessung bei maximalem Wassergehalt aufgrund der weichen, bröckligen Konsistenz des Hornes nicht möglich.

Hoof horn hardness of horn samples of warm blooded horses at physiological or maximal water content, respectively (Mw ± SD; n = 5) # Due to the soft and crumbly horn consistency, measurement of hoof hardness was not possible in maximum water containing periploc horn.

wobei Werte zwischen 27,37 ± 1,46 % (äußeres Kronhorn) und 71,36 ± 1,84 % (Saumhorn) ermittelt werden können. Bei minimalem Wassergehalt (nach Trocknung der Proben bei Raumtemperatur bis zur Gewichtskonstanz) sind segmentspezifische Unterschiede in der Hornhärte mit den angewandten Messmethoden nicht nachweisbar. So lassen sich bei allen

getrockneten Hornproben maximale Härtewerte von 100 SHORE-Einheiten messen, wobei der durchschnittliche minimale Wassergehalt zwischen $5,36 \pm 0,29 \%$ (mittleres Kronhorn) und $8,36 \pm 2,39 \%$ (Ballenhorn) liegt.

Bei Berücksichtigung aller untersuchten Hornproben ist erkennbar, dass insgesamt eine deutlich negative Korrelation zwischen der Hornfeuchte und der Hornhärte vorliegt, dass

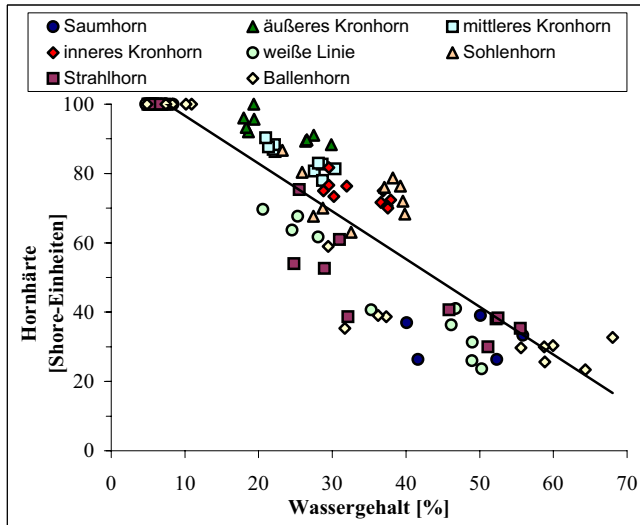


Abb 2: Korrelation zwischen dem Wassergehalt und der Härte des Hufhornes von Warmblutpferden ($n = 5$) im physiologischen, maximal feuchten bzw. getrockneten Zustand des Hornes inkl. der für alle Datenpunkte berechneten Regressionsgeraden
Correlation between water content and hoof horn hardness of warm blooded horses ($n = 5$): physiological, maximum hydrated and maximum dried state of the horn including the calculated regression line for all data points

also die Härte des Hufhornes mit zunehmendem Wassergehalt abnimmt. Diese Beziehung wird in Abb. 2 veranschaulicht, in der die Härte der Hornproben der einzelnen Pferde gegen den jeweiligen Wassergehalt des Hornes aufgetragen und die für alle Datenpunkte berechnete Regressionsgerade eingezeichnet wurde. Der für den Zusammenhang zwischen diesen beiden Materialeigenschaften für alle untersuchten Hornproben im physiologischen, im maximal feuchten und im getrockneten Zustand (insgesamt $n = 115$) berechnete Pearsonsche Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient beträgt $r = -0,91$.

Dauer von Wasseraufnahme und -abgabe

Auch hinsichtlich der Geschwindigkeit der Wasseraufnahme und der Wasserabgabe ist ein typisches segmentspezifisches Muster erkennbar (Abb. 3 u. 4). Obwohl sich die folgenden Ausführungen auf die Durchschnittswerte beziehen, die in Tab. 3 und 4 zusammengefasst sind, gelten die Aussagen größtenteils auch für die Einzeldaten der untersuchten Pferde.

Die Wasseraufnahmegeschwindigkeit der getrockneten Hornproben, die unabhängig von der Probeentnahmestelle alle eine ähnliche Ausgangsfeuchte besitzen, ist in den ersten Stunden besonders hoch (Abb. 3). Nach 2tägiger Wässerung lassen sich dagegen in allen Hornproben nur noch geringfügige Änderungen der Hornfeuchte feststellen. Insbe-

sondere das Saumhorn ist durch eine schnelle Wasseraufnahme gekennzeichnet, denn schon nach 5minütiger Wässerung ist der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt von $6,82 \%$ auf $39,62 \%$ angestiegen. Bezogen auf den jeweils maximalen Wassergehalt der Hornproben zeigt sich, dass nicht nur das Saumhorn, sondern auch das innere Kronhorn und das Horn der weißen Linie eine sehr schnelle Wasseraufnahme aufweisen. Um eine 50 %ige Sättigung zu erreichen, benöti-

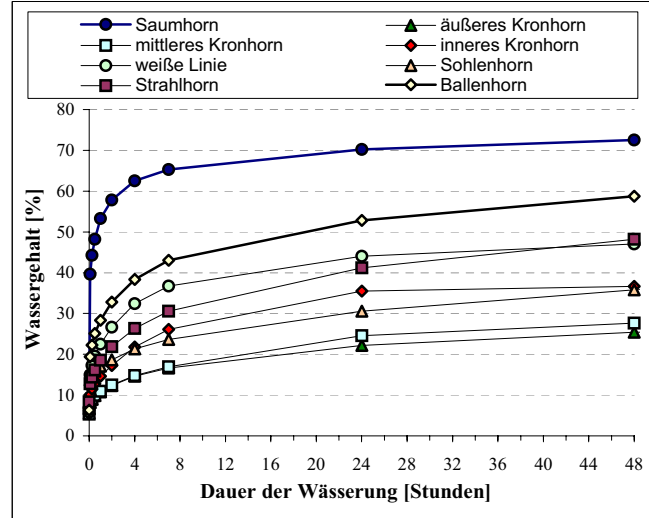


Abb 3: Geschwindigkeit der Wasseraufnahme in das Hufhorn von Warmblutpferden (Mw; $n = 5$) in den ersten 48 Stunden ausgehend vom minimalen Wassergehalt
Water uptake rate of hoof horn of warm blooded horses (Mw; $n = 5$) in the first 48 hours after minimum hydration.

gen die Saumhornproben beispielsweise 2 - 4 Stunden und die Proben aus dem inneren Kronhorn sowie der weißen Linie 4 - 7 Stunden, während die Hälfte des maximal möglichen Wassergehaltes in allen übrigen Segmenten erst nach 7 - 24 Stunden erreicht wird. Besonders deutlich werden die segmentspezifischen Unterschiede, wenn man die relative Wasseraufnahme nach 24 Stunden betrachtet. Im Sohlen-, Ballen- und Strahlhorn wird das Wasser verhältnismäßig langsam aufgenommen, denn nach 24 Stunden ist erst eine $60 - 70 \%$ ige Sättigung erreicht. Im äußeren und mittleren Kronhorn sind zu diesem Zeitpunkt bereits mehr als 70% , im Horn der weißen Linie und im Saumhorn mehr als 80% und im inneren Kronhorn sogar fast 92% des Wassers aufgenommen worden. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Messung der Wasseraufnahme für das Saumhorn vorzeitig beendet werden musste, da bei diesen Proben bereits nach 4tägiger Wässerung Auflösungserscheinungen zu beobachten waren.

Die Geschwindigkeit der Wasserabgabe aus dem maximal feuchten Horn lässt ähnliche segmentspezifische Unterschiede erkennen (Abb. 4). Anders als bei der Wasseraufnahme erfolgt die Wasserabgabe in den ersten acht Stunden jedoch annähernd proportional zur Zeit. Dabei sind wiederum das Saum- und das innere Kronhorn sowie das Horn der weißen Linie besonders hervorzuheben, da die Wasserspeicherfähigkeit in diesen Segmenten bzw. Subsegmenten geringer ist als in den übrigen Hufsegmenten. Bezogen auf den jeweiligen maximalen Wassergehalt ist nämlich die Hälfte des aufgenommenen Wassers im Saum- und inneren Kronhorn bereits nach etwa fünf Stunden, im Horn der weißen Linie sogar

schon nach ca. vier Stunden abgegeben. Alle übrigen Segmente zeigen eine deutlich längere Wasserspeicherung, denn eine relative Wasserabgabe von 50 % ist erst nach mehr als acht Stunden erreicht. Nach 24 Stunden hat das Saumhorn bereits über 90 %, das Horn der weißen Linie etwa 84 % und das innere Kronhorn ca. 74 % des aufgenommenen Wassers wieder an die Umgebung abgegeben. In den übrigen Segmenten liegt die relative Wasserabgabe zu diesem

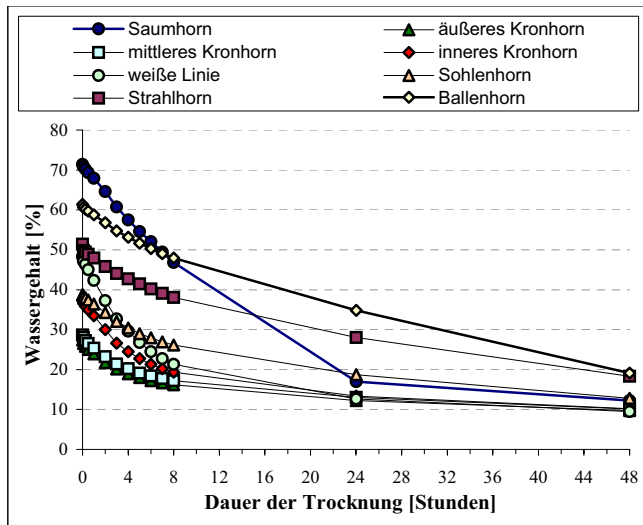


Abb 4: Geschwindigkeit der Wasserabgabe aus dem Hufhorn von Warmblutpferden (Mw; n = 5) in den ersten 48 Stunden ausgehend vom maximalen Wassergehalt

Water release rate of hoof horn of warm blooded horses (Mw; n =5) in the first 48 hours after maximum hydration

Zeitpunkt dagegen unter 70 %. Bereits nach zwei Tagen sind in den meisten Hornproben während der Trocknung nur noch geringe Veränderungen hinsichtlich des Wassergehaltes festzustellen. Obwohl der absolute Wassergehalt bei fast allen Hornproben nach 14 Tagen bei annähernd 7 % liegt (eine Ausnahme bildet lediglich das Saumhorn mit ca. 12 %) lassen sich hinsichtlich der relativen Wasserabgabe jedoch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Hufsegmenten erkennen. Während das Saum- und das Ballenhorn bereits nach 14-tägiger Trocknung ca. 95 % des aufgenommenen Wassers wieder abgegeben haben, zeigen das äußere und das mittlere Kronhorn nach dieser Zeitspanne noch eine beachtliche Wasserspeicherung, denn die relative Wasserabgabe liegt in diesen Hornproben durchschnittlich erst bei 80-85 %. Das Horn der übrigen Segmente nimmt eine Zwischenstellung ein. So ist im Sohlen- und im inneren Kronhorn nach 14 Tagen mehr als 85 %, im Strahlhorn und im Horn der weißen Linie mehr als 90 % des zuvor aufgenommenen Wassers wieder an die Umgebung abgegeben worden.

Diskussion

Da in einigen Segmenten zur Gewährleistung des Hufmechanismus sowie zur federnd-elastischen Kraftübertragung und Verankerung des Hufbeinträgers eine gewisse Verformbarkeit und Elastizität des Hornes unerlässlich sind, darf die Hornqualität nicht mit der Hornhärte gleichgesetzt werden. Charakteristisch für eine gute Hornqualität ist vielmehr eine optimale Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen und

mikrobiellen Umwelteinflüssen kombiniert mit einer idealen Anpassung an die mechanischen Anforderungen bei der Fußung des Pferdehufes. Qualitativ schlechtes Horn kann diese Schutzfunktionen nicht erfüllen und stellt somit eine strukturelle Schwachstelle und eine Prädispositionsstelle für Erkrankungen dar. Um die segmentspezifischen Qualitätsunterschiede zu objektivieren, ist eine Bestimmung der Hornhärte jedoch gut geeignet. Sie muss allerdings in Zusammenhang mit anderen mechanisch-physikalischen Materialeigenschaften wie dem Wassergehalt, der Wasseraufnahmekapazität und der Wasserspeicherfähigkeit des Hufhornes gesehen werden. Darüber hinaus spielen auch strukturelle Parameter eine Rolle. So wird die Hornqualität durch die Hornarchitektur sowie inter- und intrazelluläre Faktoren beeinflusst (Pellmann et al. 1993), die ihrerseits durch komplexe Differenzierungsprozesse der verhornenden Epidermis bestimmt werden.

Während die Hornstruktur durch die Probengewinnung und -lagerung weitgehend unbeeinflusst bleibt, ist eine gewisse Beeinträchtigung einiger mechanisch-physikalischer Parameter nicht auszuschließen. Kritisch zu beurteilen ist insbesondere die Entfernung der Hornproben aus ihrem natürlichen Zusammenhang im Hornschuh, wobei künstliche Oberflächen geschaffen werden, die physiologischerweise nicht den Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Infolgedessen muss mit einer gewissen Diskrepanz zwischen den gemessenen Werten und den tatsächlichen Gegebenheiten im Horn einer intakten Hufkapsel gerechnet werden, die an gegebener Stelle kurz diskutiert werden. Das Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit lag darin, die in Abhängigkeit von der Funktion des Hufhornes in den verschiedenen Segmenten variierenden Horneigenschaften herauszuarbeiten, wozu die angewandte Methodik der Materialbearbeitung durchaus geeignet ist. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Hufsegmenten hinsichtlich der Hornhärte sind beträchtlich. Obwohl das Horn in benachbarten Epidermisabschnitten gebildet wird, differiert die Härte zwischen dem sehr weichen Saumhorn und dem extrem harten äußeren Kronhorn bei den untersuchten Hornproben beispielsweise um durchschnittlich 64,23 SHORE-Einheiten. Dass die Hornhärte auch innerhalb eines Segmentes erheblich variieren kann, zeigt das Beispiel des Kronhornes. So nimmt die Härte innerhalb der Hufplatte bei den untersuchten Pferden vom äußeren zum inneren Kronhorn um durchschnittlich 18,80 SHORE C-Einheiten ab. Nach Hinterhofer et al. (2001) und Patan (2001) ist das Horn im Kronsegment außerdem durch eine Härtezunahme von proximal nach distal bzw. durch eine Abnahme der Hornhärte von dorsal nach palmar/plantar gekennzeichnet.

Da zwischen der Hornhärte und dem Feuchtigkeitsgehalt des Hornes eine negative Korrelation besteht (Abb. 2), hängen die beschriebenen Härteunterschiede unter anderem mit dem unterschiedlichen Wassergehalt des Hornes zusammen. Auch der innerhalb der Hufplatte festgestellte Härtegradient lässt sich teilweise damit erklären, dass der physiologische Wassergehalt vom äußeren zum inneren Kronhorn um durchschnittlich 11,26 % zunimmt. Dieser Feuchtigkeitsgradient ist nach Bertram und Gosline (1987) durch den Abstand zur Wandlederhaut bedingt. In der Nähe der Wandlederhaut ist der Wassergehalt des Hornes hoch, da fortwährend Flüssigkeit aus der vaskularisierten Lederhaut in die Epidermis diffundiert. Mit zunehmender Diffusionsstrecke nimmt der Wassergehalt des Hornes innerhalb der Hufplatte ab. Darüber

hinaus müssen die Materialeigenschaften des Hufhornes jedoch auch durch die Hornstruktur (also die Hornarchitektur sowie inter- und intrazelluläre Faktoren) beeinflusst werden, denn der Härteunterschied zwischen dem Sohlen- und dem Strahlhorn von durchschnittlich 17,20 SHORE-Einheiten lässt sich nicht allein durch den um 0,89 % variierenden Wassergehalt erklären.

Die Architektur des Hornzellverbandes spielt für die segmentspezifischen Unterschiede der untersuchten Materialeigenschaften lediglich eine untergeordnete Rolle (Patan 2001). Eine erhebliche Beeinflussung der Horneigenschaften erfolgt dagegen durch die interzellulären Strukturparameter. So bedingt beispielsweise die abweichende Zusammensetzung des Interzellularkittes in den einzelnen Hufsegmenten eine unterschiedlich ausgeprägte interzelluläre Wasserbarriere (Kempson und Campbell 1998), die für die segmentspezifischen Unterschiede der Wasseraufnahmekapazität mitverantwortlich ist. Eine Besonderheit in Form einer interzellulären tropfenförmigen Wasserspeicherung liegt im Saumhorn vor (Budras et al. 2002), wodurch einerseits die hohe Wasseraufnahmekapazität und andererseits die schnelle Wasserabgabe und somit die nur geringe Speicherdauer des Wassers bedingt sind.

Frohnes und Budras (2001) sehen außerdem einen Zusammenhang zwischen der Hornkonsistenz und der Weite des Interzellularraumes. Sie führen die weichelastische Konsistenz im Ballen- und Strahlhorn unter anderem auf das vermehrte Vorhandensein großblasiger Erweiterungen im Interzellularraum zurück. Ein weiterer Faktor, der die Hornhärte beeinflusst, ist der Lipidgehalt des Hornes. So lassen sich im weichen Horn des Ballen-Strahlsegmentes zahlreiche inter- sowie intrazelluläre Fetttropfchen feststellen, während das harte Sohlenhorn nur einen niedrigen Lipidgehalt aufweist (Frohnes und Budras 2001).

Von besonderer Bedeutung für die Segmentspezifitäten der untersuchten mechanisch-physikalischen Materialeigenschaften sind die intrazellulären Faktoren, wobei den Strukturproteinen der verhornten Epidermiszellen eine besondere Bedeutung zukommt. Insbesondere die Proteinzusammensetzung, bzw. der Anteil bestimmter Keratinproteine und Keratinfilament-assoziiierter Proteine (KFAP) dürfte für die segmentspezifischen Unterschiede der intrazellulären Wasseraufnahme mitverantwortlich sein. Dabei scheinen die Letzteren eine besondere Rolle zu spielen, da das Horn in den Hufsegmenten mit der höchsten Wasseraufnahmekapazität – also das Saum- und das Ballenhorn – durch das Vorhandensein von spezifischen KFAP (sogenannte Filaggrine) gekennzeichnet sind. Die Vorläufermoleküle dieser Proteine werden im Stratum granulosum in den für die weiche Verhornung typischen Keratohyalingranula gespeichert. Das Horn in den übrigen Segmenten, das im Modus der harten Verhornung, also ohne Synthese dieser Granula gebildet wird, weist dagegen eine andere Proteinzusammensetzung bezüglich der KFAP auf, wobei sogenannte „high-sulfur“ (HS)- und „high-tyrosin“ (HT)-Proteine unterschieden werden (Grosenbaugh und Hood 1992).

Die in der Saum- und Ballenepidermis gebildeten Filaggrine sind besonders reich an den Aminosäuren Histidin und Serin, die zur Bildung von Wasserstoffbindungen (H-Brücken) fähig

sind (Steinert et al. 1984). Durch diese nicht-kovalenten Bindungen können entweder andere Proteine wie beispielsweise Keratinfilamente oder aber Wassermoleküle reversibel gebunden werden. Aufgrund ihrer besonderen Aminosäurezusammensetzung besitzen die Filaggrine anscheinend eine höhere Wasserbindungsfähigkeit als die Keratinfilament-assoziierten Proteine der harten Verhornung, obwohl auch Letztere (insbesondere die HT-Proteine) HBrücken in größerem Ausmaß ausbilden können (Bertram und Gosline 1987; Grosenbaugh und Hood 1992). Die HS-Proteine sind dagegen durch einen hohen Gehalt der schwefelhaltigen Aminosäure Cystein gekennzeichnet, über deren Sulfhydrylgruppen die Ausbildung von Disulfidbindungen ermöglicht wird. Diese kovalenten Bindungen tragen wesentlich zur Bildung der stabilen und festen Struktur des Hornzellverbandes im harten Hufhorn wie beispielsweise dem Kronhorn bei (Grosenbaugh und Hood 1992; Steinert et al., 1984).

Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften des im Modus der harten Verhornung gebildeten Hufhornes sind vermutlich durch ein segmentspezifisches Verhältnis von HS- zu HT-Proteinen und somit durch eine unterschiedliche Kombination von Disulfid- und Wasserstoffbindungen bedingt. Dabei dürften die KFAP im relativ weichen Horn des Strahls und der weißen Linie, das eine verhältnismäßig hohe Wasseraufnahmekapazität besitzt, vorwiegend zu den HT-Proteinen gehören. Im Kron- und Sohlenhorn, das durch eine hohe mechanische Stabilität gekennzeichnet ist, dürften dagegen die HS-Proteine überwiegen.

Darüber hinaus sind vermutlich auch die Keratinproteine für die segmentspezifischen Unterschiede der mechanischen Horneigenschaften mitverantwortlich, denn ähnlich wie bei den KFAP unterscheidet sich deren Aminosäurezusammensetzung in Abhängigkeit vom Verhornungstyp. So besitzen auch die im Modus der harten Verhornung gebildeten Zytokeratine einen größeren Anteil an Cystein (Grosenbaugh und Hood 1992) und somit die Fähigkeit, zahlreiche Disulfidbindungen zu bilden. Die im Zuge der weichen Verhornung gebildeten Keratine enthalten hingegen vorwiegend solche Aminosäuren, die die Ausbildung von HBrücken ermöglichen (Steinert et al. 1985).

Die Proteinzusammensetzung ist nicht nur für die unterschiedliche Wasseraufnahmekapazität, sondern auch für die segmentspezifischen Unterschiede hinsichtlich der Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsaufnahme und der Wasserspeicherfähigkeit des Hufhornes entscheidend. So weisen das äußere und mittlere Kronhorn sowie das Sohlenhorn, das bei einer langsamen Wasseraufnahmegeschwindigkeit durch eine verhältnismäßig geringe Wasseraufnahmekapazität gekennzeichnet ist, eine typische solide Zytoarchitektur auf (Abb. 5a). Aufgrund der diffusen Bindung der Wassermoleküle an die Strukturproteine erfolgt die Wasserabgabe an die Umgebung jedoch nur sehr langsam, wodurch insgesamt eine relativ lange Speicherung der Feuchtigkeit resultiert. Das Horn in den Hufsegmenten mit einer hohen Wasseraufnahmegeschwindigkeit ist dagegen durch eine große Anzahl spongiöser Räume gekennzeichnet, die sich zwischen den Keratinfilamentbündeln und somit im Bereich der KFAP befinden (Abb. 5b). Das gilt sowohl für das innere Kronhorn als auch für das Blättchenhorn des Wandsegmentes (Budras und Patan 2003). Offensichtlich ermöglichen diese Hohlräume eine schnelle

Wasseraufnahme, wobei sich die Hornzellen wie ein großporiger Schwamm vollsaugen. Da sich das Wasser in den spongiösen Räumen sammelt, ohne fest gebunden zu sein, wird die Flüssigkeit in trockener Umgebung ebenso schnell auch wieder abgegeben. Die Wasserspeicherkapazität dieses Hufhornes ist somit eher gering einzustufen. Unter natürlichen Gegebenheiten ist der Wasserverlust des Wand- und des inneren Kronhornes allerdings durch die Nähe zur vaskularisierten Lederhaut und aufgrund der Eigenschaften des äußeren

le Bedeutung. Das äußere Kronhorn und das Sohlenhorn müssen beispielsweise eine hohe Widerstandsfähigkeit besitzen, um dem gesamten Zehenendorgan einen optimalen Schutz gegenüber mechanischen Umwelteinflüssen bieten zu können. Der innere Anteil der Hufplatte muss dagegen verhältnismäßig weich und verformbar sein, damit die Zugkraft des Hufbeinträgers federnd-elastisch aufgenommen und weitergeleitet werden kann. Um eine gleichmäßigen Kraftübertragung innerhalb der Hufplatte zu ermöglichen, ist es

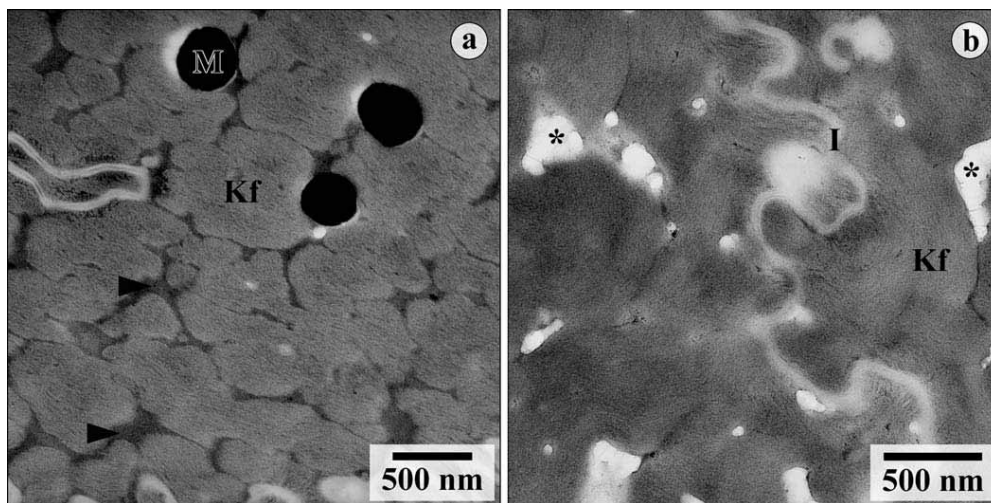


Abb 5: Vergleich der Zytoarchitektur von äußerem und innerem Kronhorn. a) Im harten äußeren Kronhorn besitzen die Hornzellen eine solide Zytoarchitektur: Die Keratinfilamente (Kf) sind von Keratinfilament-assoziierten Proteinen (Pfeilkopf) umgeben. Die Wasserspeicherung erfolgt vorwiegend durch eine diffuse Bindung der Wassermoleküle an die Strukturproteine über Wasserstoffbrücken. (M = Melaningranula). b) Das weichere innere Kronhorn ist durch eine spongiöse Zytoarchitektur gekennzeichnet: Insbesondere in der Röhrenrinde sind die Keratinfilamente von spongiösen Hohlräumen (Sternchen) umgeben.

ben, die einerseits eine rasche Wassereinlagerung ermöglichen, andererseits aber auch für die schnelle Wasserabgabe verantwortlich sind. I = Interzellularspalt

Comparison of the cytoarchitecture of outer and inner coronary horn. a) In the hard outer coronary horn the horn cells display a solid cytoarchitecture. The keratin filaments (Kf) are surrounded by keratin-filament-associated proteins (arrow head). Water storage occurs mainly by diffuse bonding of water molecules to the structural proteins via hydrogen bonds. (M = melanin granules). b) The softer inner coronary horn is characterised by a spongy cytoarchitecture: Particularly in the tubular cortex the keratin filaments are surrounded by spongy cavity (asterisk) which in turn enable a quick water storage on the one hand, but are also responsible for the quick water release on the other hand. (I = intercellular cleft)

ren Kronhornes begrenzt, da nur der äußere Anteil der Hufplatte den Umweltbedingungen in größerem Ausmaß ausgesetzt ist. Dadurch wird eine gewisse Speicherung der Feuchtigkeit innerhalb der Hufkapsel erreicht.

Das Horn im Ballen-Strahlsegment nimmt eine Sonderstellung ein, da es sowohl solide als auch spongiöse Anteile besitzt (Frohnes 1999). Die spongiösen Räume in der inneren Röhrenrinde dürften für die relativ hohe Wasseraufnahmekapazität dieses Hornes verantwortlich sein. Das Zwischenröhrenhorn und die äußere Röhrenrinde besitzen dagegen eine solide Zytoarchitektur (Frohnes 1999). Die verhältnismäßig langsame Wasserabgabe und die dadurch bedingte langfristige Wasserspeicherung dürften mit der reversiblen Bindung des Wassers an die Strukturproteine der Hornzellen über die bereits erwähnten HBrücken zusammenhängen.

Die Wasserstoffbindungen sind auch eine Erklärung für die negative Korrelation zwischen der Härte und dem Wassergehalt des Hufhornes. In Gegenwart von Wasser sind nämlich die Bindungsstellen der H-Brücken durch die Wassermoleküle besetzt. Daher nimmt mit zunehmendem Wassergehalt die Anzahl der Wasserstoffbindungen zwischen den Strukturproteinen der Hornzellen ab, wodurch sich die intrazelluläre Stabilität und somit die Hornhärte verringert.

Die beschriebenen segmentspezifischen sowie die intrasegmentalen Qualitätsunterschiede haben eine große funktionel-

außerdem notwendig, dass das weiche Wandhorn allmählich in das harte äußere Kronhorn übergeht. Bei einem abrupten Übergang würden nämlich an der Grenzfläche hohe Spannungen entstehen (Douglas et al. 1996; Kasapi und Gosline 1997), wodurch Rissbildungen zwischen den Hornschichten vorprogrammiert wären. Derartige Zusammenhangsstörungen innerhalb der Hufplatte sind unter dem Erkrankungsbild der losen bzw. hohlen Wand bekannt. Selbst Mikrorisse, die makroskopisch nicht sichtbar sind, stellen eine potentielle Gefahr dar, da sie als eine Eintrittspforte für aufsteigende Infektionen angesehen werden müssen. Beim Erreichen der Huflederhaut können diese zu einer eitrigen Pododermatitis führen.

Auch der Übergang zwischen der weichen, sehr elastischen behaarten Haut und der Hufkapsel ist prädestiniert für Spannungen. Um diese Spannungen zu minimieren, grenzt die behaarte Haut nicht direkt an das harte Kronhorn, sondern es wird vielmehr ein fließender Übergang durch die Bildung des weich-elastischen Saum- und Ballenhornes geschaffen (Budras et al. 2002).

Die weiche Konsistenz und die Flexibilität des Hornes im Ballen-Strahlsegment sind schließlich von großer Bedeutung für den Hufmechanismus, wobei eine Abfederung und Dämpfung der bei der Fußung auftretenden Druckkräfte erreicht wird. Da die weich-elastische Konsistenz des Hornes im Saum- und Ballen-Strahlsegment nur bei einem gewissen

Wassergehalt gewährleistet ist, führt eine Austrocknung dieses Hornes zu Funktionseinbußen. Das gilt insbesondere für das Saumhorn, das eine nur kurzfristige Wasserspeicherung zulässt. Um der Austrocknungstendenz entgegenzuwirken, sollte der Saumbereich regelmäßig befeuchtet und anschließend eingefettet werden. Im Ballen-Strahlsegment spielen diese Hufpflegetmaßnahmen aufgrund der hohen Wasserspeicherfähigkeit des Hornes nur eine untergeordnete Rolle.

Literatur

- Bertram J.E.A. und J.M. Gosline (1987): Functional design of horse hoof keratin: The modulation of mechanical properties through hydration effects. *J. Exp. Biol.* 130, 121-136
- Budras K.-D. und B. Huskamp (1999): Belastungshufrehe – Vergleichende Betrachtungen zu anderen systemischen Hufreheerkrankungen. *Pferdeheilkunde* 15, 89-110
- Budras K.-D. und B. Patan (2003): Segmentspezifitäten am Pferdehuf. 1. Teil: Struktur- und Funktionsvarianten. *Pferdeheilkunde* 19, 58-64
- Budras K.-D., B. Patan und C. Mülling (2002): Raster- und transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen und physikalische Messungen zur Wasserbindungskapazität am Saumhorn des Pferdehufes. *Wien. Tierärztl. Mschr.* 89, 180-187
- Douglas J.E., C. Mittal, J.J. Thomason und J.C. Jofriet (1996): The modulus of elasticity of equine hoof wall: Implications for the mechanical function of the hoof. *J. Exp. Biol.* 199, 1829-1836
- Frohnes A.-K. (1999): Struktur, Verhornung und Hornqualität im Sohlen- und Ballen-Strahlsegment des Pferdehufes. Berlin, Freie Univ., Fachber. Veterinärmed., Diss.
- Frohnes A.-K und K.-D. Budras (2001): Endogene Einflussfaktoren auf die Hornqualität im Sohlen- und Ballen-Strahlsegment des Pferdehufes. Teil 2: Intra- und Interzelluläre Faktoren. *Pferdeheilkunde* 17, 437-443
- Grosenbaugh D.A. und D.M. Hood (1992): Keratin and associated proteins of the equine hoof wall. *Am. J. Vet. Res.* 53, 1859-1863
- Hinterhofer C., C. Stanek und K. Binder (1998): Elastic modulus of equine hoof horn, tested in wall samples, sole samples and frog samples at varying levels of moisture. *Berl. Münch. Tierärztl. Wochenschr.* 111, 217-221
- Hinterhofer C., J. Bongartz, C. Gabler und C. Stanek (2001): Shore-D-Härte und Kugeleindruckhärte von Hufhorn in verschiedenen Wandsegmenten beim Pferd. *Tierärztliche Praxis* 29, 206-211
- Kasapi M.A. und J.M. Gosline (1997): Design complexity and fracture control in the equine hoof wall. *J. Exp. Biol.* 200, 1639-1659
- Kempson S.A. und E.H. Campbell (1998): A permeability barrier in the dorsal wall of the equine hoof capsule. *Equine Vet. J. (Suppl.)* 26, 15-21
- 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.
- Naumann J., O. Dietz und G. Prietz (1987): Untersuchungen zur anorganischen Zusammensetzung und zur Stabilität von Huf- und Klauenhorn. *Wien. Tierärztl. Monatsschr.* 74, 117-121
- Patan B. (2001): Saisonaler Einfluss auf Hornbildungsrate, Hornabrieb und Hornqualität in der Hufwand von Przewalskipferden (*Equus ferus przewalskii*). *Vet. Med. Diss. Freie Universität Berlin*
- Pellmann R., S. Reese und H. Bragulla (1993): Wechselwirkungen zwischen Hornstruktur und Hornqualität am Pferdehuf als Grundlage für das Verständnis von Verhornungsstörungen. *Monatsh. Vet. Med* 48, 623-630
- Steinert P.M., J.C.R. Jones und R.D. Goldman (1984): Intermediate filaments. *J. Cell Biol. (Suppl.)* 99, 22s-27s
- Steinert P.M. D.A.D. Parry, W.W. Idler, L.D. Johnson, A.C. Steven und D.R. Roop (1985): Amino acid sequences of mouse and human epidermal type II keratins of Mr 67,000 provide a systematic basis for the structural and functional diversity of the end domains of keratin intermediate filament subunit. *J. Biol. Chem.* 260, 7142-7149

Herrn Prof. Dr. Dr. hc. Huskamp zum 70. Geburtstag gewidmet

Dr. Bianca Patan
 Klinik für Orthopädie bei Huf- und Klautieren
 Veterinärmedizinische Universität Wien
 Veterinärplatz 1
 A-1210 Wien
 bianca.patan@vu-wien.ac.at