

## II. LITERATURÜBERSICHT

### 1. Definition des Hufes und seiner Segmente

#### 1.1 Der Huf (Ungula)

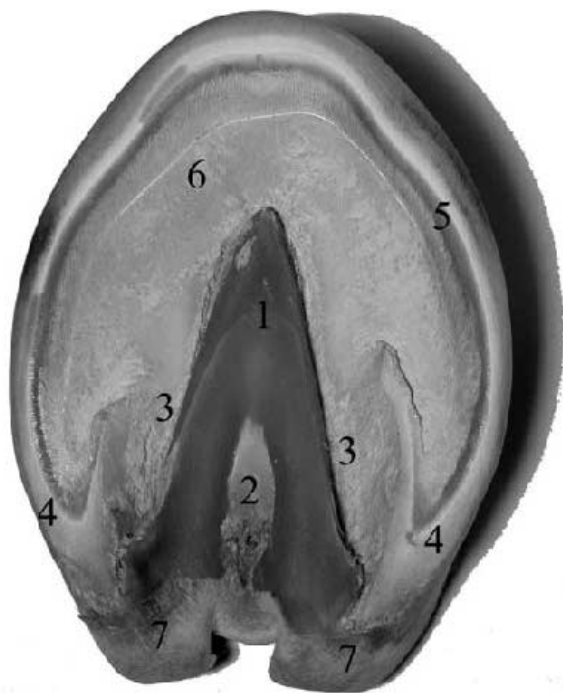
Der Huf des Pferdes ist eine Modifikation der Haut, die die distalen, mechanisch stark beanspruchten Gliedmaßeanteile schützt (ZIETZSCHMANN, 1913). Das Hufhorn der Oberhaut (Epidermis) des Hufes besteht aus toten Hornzellverbänden, die aus der Keratinisierung und Verhornung der lebenden Hufoberhautzellen hervorgegangen sind (FROHNES u. BUDRAS, 2001) und durch eine biologische Kittsubstanz (Interzellularkitt, Membrane Coating Material) fest miteinander verbunden sind (BUDRAS et al., 1989; MÜLLING, 1993). MÜLLING und Mitarbeiter (1994 b) vergleichen den Hornzellverband bezüglich seines Aufbaues mit einem Ziegelmauerwerk, wobei die Hornzellen die Ziegelsteine und der Interzellularkitt den Mörtel repräsentieren.

Die drei Schichten der modifizierten Haut des Hufes sind die Hufunterhaut (Tela subcutanea ungulae), die Huflederhaut (Corium ungulae) und die Hufoberhaut (Epidermis ungulae), wobei die gesamte Hufoberhaut als Hufkapsel (Capsula ungulae) bezeichnet wird (BOLLIGER u. GEYER, 1992; BUDRAS u. RÖCK, 2004). Der verhornte Teil der Hufkapsel ist die Hornkapsel. Die Hufkapsel wird wiederum unterteilt in die Hornwand, in die Hornsohle und in den Hornstrahl (NÖRNER, 1886; STUMP, 1967). BUDRAS und Mitarbeiter (1989) unterteilen die Hufplatte (= Hornwand) in den Zehenrückenteil (die Vorderwand), in den medialen und lateralen Seitenteil, in einen medialen und lateralen Trachtenteil und in einen medialen und lateralen Eckstrebenenteil. Der proximale Rand der Hufplatte (= Hornwand) am Übergang zur behaarten Haut wird als Kronrand (Margo coronalis) und der distale, lasttragende Rand der Hufplatte als Tragrand (Margo solearis sive distalis) bezeichnet (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Die Sohle liegt zwischen dem Tragrand (Margo solearis) und dem Strahl (Cuneus) auf der Basisfläche des Hufes, wobei der Strahl sich aus Strahlspitze und zwei Strahlschenkeln zusammensetzt. Zwischen den Strahlschenkeln befindet sich die mittlere Strahlfurche und seitlich von den Strahlschenkeln befinden sich die beiden seitlichen Strahlfurchen (BUDRAS et al., 1989). Palmar bzw. plantar der Basis des Strahles schließt sich der Ballen an, welcher proximal in die behaarte Haut übergeht (HABERMEHL, 1996).

ZIETZSCHMANN (1918) definierte den Begriff des Zehenendorgans (bei Equiden der Huf), welches er in Übereinstimmung mit HABERMEHL (1996) aufgrund struktureller Besonderheiten in fünf Segmente gliedert: Das Saumsegment (Limbus), das Kronsegment

## Literaturübersicht

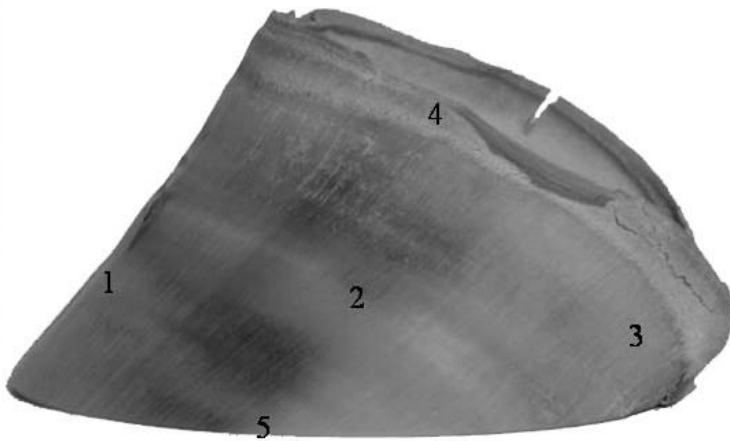
(Corona), das Wandsegment (Paries), das Sohlensegment (Solea) und das Ballen- und Strahlsegment (Torus et Cuneus). Als Huf im engeren Sinne bezeichnen GEGENBAUR (1885) und HABERMEHL (1996) die von der Huflederhaut vollständig abgelöste, isolierte, epidermale Hufkapsel. Die modifizierten und stark verhornten Anteile der Haut des Hufes bilden zusammen mit denen von ihnen umhüllten Teilen des Zehenendes, incl. der zentralen Stützteile, des Hufgelenkes, der Sehnen und Bänder, den Huf im weiteren Sinne (HABERMEHL, 1996; LEISERING u. HARTMANN, 1876; STUMP, 1967; ZIETZSCHMANN, 1918). Nach GREYER (1911) zählen zu den zentralen Stützteilen des Hufes der distale Teil des Kronbeines, das Hufbein, das Strahlbein, die distalen Teile der beiden Hufknorpel, der Hufrollenschleimbeutel und alle von der Hornkapsel umhüllten Sehnen und Bänder.



### Textabb. 1:

#### **Ansicht der distalen Fläche eines Pferdehufes**

- 1. Strahl**
- 2. mittlere Strahlfurche**
- 3. seitliche Strahlfurchen**
- 4. Eckstreben**
- 5. weiße Linie**
- 6. Sohle**
- 7. Ballen**



**Textabb. 2:**

**Seitenansicht eines ausgeschuhten Pferdehufes**

- 1. Zehenrückenteil**
- 2. Seitenteil**
- 3. Trachtenteil**
- 4. Saumhorn**
- 5. Tragrand**

## **1.2 Hufoberhaut (Epidermis ungulae, Hufkapsel)**

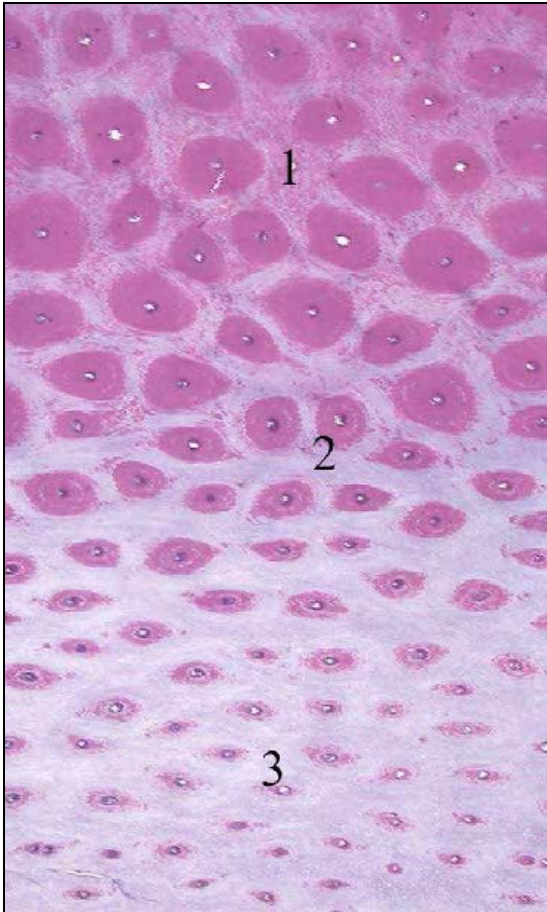
Die Hufkapsel des Pferdehufes ist eine modifizierte Oberhaut mit einer protektiven Funktion. Ihre dicke Hornschicht setzt sich aus vollständig verhornten epithelialen Zellen zusammen (KEMPSON u. CAMPBELL, 1998). Die Epidermis des Pferdehufes besteht aus einem Stratum basale (auch Stratum germinativum genannt, da aus mitotisch aktiven Zellen aufgebaut), einem Stratum spinosum (et granulosum – im Zuge der weichen Verhornung nur im Saum- und Ballensegment) und einem Stratum corneum. Das Stratum germinativum sive basale und das Stratum spinosum werden zusammen als epidermale Matrix (Muttergewebe) bezeichnet, wo die Keratinisierung der lebenden Zellen stattfindet (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995). Die Ernährung der gefäßlosen Epidermis erfolgt nach dem Prinzip der Diffusion über die gut vaskularisierte Lederhaut (BERTRAM u. GOSLINE, 1987; BUDRAS u. KÖNIG, 1999) und ihre Oberflächen verhalten sich zueinander wie Patrizie und Matrizie (BUDRAS u. RÖCK, 2004; HABERMEHL, 1996; ZIETZSCHMANN, 1918). HABERMEHL (1996) bezeichnet die gesamte verhornte Oberhaut des Saum-, Kron- und Wandsegmentes als Hornwand oder Hufplatte. Dabei unterscheidet der Autor drei Schichten:

- Glasurschicht (Stratum externum, Eponychium, Saumhorn)
- Haupt- oder Schutzschicht (Stratum medium, Mesonychium, Kronhorn)
- Verbindungsschicht (Stratum internum, Hyponychium, Wandhorn, Blättchenschicht)

Das Horn der Saumepidermis stellt einen nur sehr schmalen Streifen dar, der wenige Zentimeter unterhalb des Kronwulstes schon nicht mehr vorhanden ist (BRUHNKE, 1931). BOLLIGER und GEYER (1992) bezeichnen den oberflächlichsten Teil der Hornwand als Saumhorn, welcher angrenzend an die behaarte Haut gebildet wird.

### 1.2.1 Aufbau des Hufhornes

Basierend auf seiner Röhrenchenstruktur teilen BOLLIGER und GEYER (1992), BRUHNKE (1931), KÖNIG (2001), KÖNIG und BUDRAS (2003), NICKEL (1938), PATAN (2001) sowie TSCHERNE (1910) das Kronhorn in eine äußere, eine mittlere und eine innere Zone ein (Textabb. 3). In Bezug auf die Röhrendichte sind signifikante Unterschiede in den einzelnen Zonen zu vermerken (REILLY et al., 1998 a). Im *inneren Kronhorn* finden sich meist große, runde Hornröhren mit einem runden Markraum (BUCHER, 1987; HARNISCH, 1996; KÖNIG u. BUDRAS, 2003; NICKEL, 1939). In dieser Schicht besitzen die Röhren eine spongiöse Rinde und weichen dadurch von der Architektur des mittleren und äußeren Kronhornes ab. Zudem ist der Anteil an Zwischenröhrenhorn hier relativ hoch bei nur 7 bis 8 Röhren pro  $\text{mm}^2$  (KÖNIG, 2001; KÖNIG u. BUDRAS, 2003; SCHROTH, 2001). Die *mittlere Zone* des Kronhornes weist kleinere querovale Röhren mit rundem Markraum auf (ANTHAUER, 1996; BUCHER, 1987; KÖNIG u. BUDRAS, 2003). In diesem Teil des Kronhorns sind etwa 11 Röhren pro  $\text{mm}^2$  enthalten. Die Rindenzellen dieser Hornröhren sind von solider Struktur und nur vereinzelt sind ein marginales Band (eine Hülle aus Proteinen auf der Innenseite der Hornzellmembran, s. u.), Desmosomenreste und gap junctions auffindbar (KÖNIG u. BUDRAS, 2003). Im *äußeren Kronhorn* liegen ovale Hornröhren mit einem im Querschnitt ovalen Markraum vor, die oberflächenparallel abgeplattet sind. Die dünne Rindenschicht weist hier eine sehr solide Zytoarchitektur mit einem gleichmäßig engen Interzellulärspace auf. In dieser Schicht findet sich die größte Anzahl an Hornröhren mit 15 bis 19 Röhren pro  $\text{mm}^2$  (BOLLIGER u. GEYER 1992; KÖNIG u. BUDRAS, 2003; SCHROTH, 2002). Als eine strukturelle Besonderheit zeigen das mittlere und innere Kronhorn neben den einfachen Hornröhren zusammengesetzte Hornröhren mit mehreren Markräumen (TSCHERNE, 1910).



**Textabb. 3:**

**Querschnitt durch das Kronhorn des Zehenrückenteiles, HE-Färbung, urspr. Vergr. 31,25x**

- 1. inneres Kronhorn**
- 2. mittleres Kronhorn**
- 3. äußeres Kronhorn**

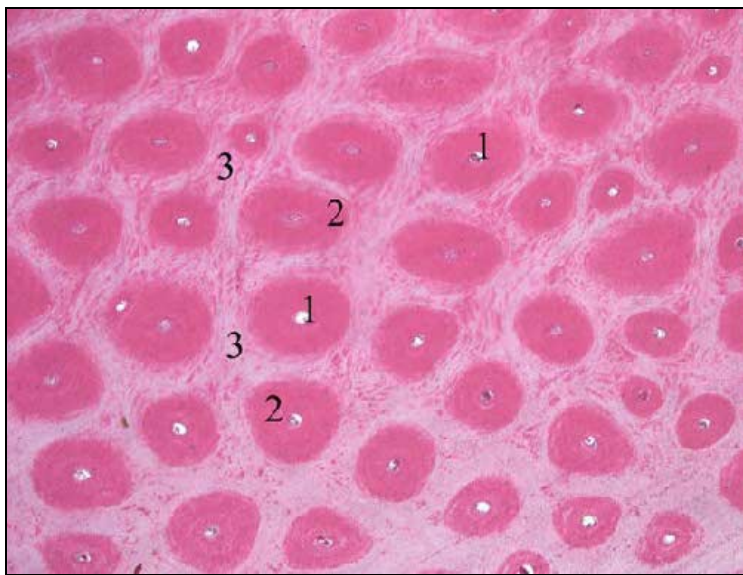
Die Hornröhrchen des Kronhornes besitzen einen Durchmesser von bis zu 0,5 mm (BUDRAS et al., 1998; KASAPI u. GOSLINE, 1998). TSCHERNE (1910) gibt als Röhrchendurchmesser für die äußere Zone des Kronhornes im Bereich des Zehenrückenteiles 0,21 mm an. In der mittleren Zone beträgt dieser 0,14 mm und in der inneren Zone 0,665 mm. Die stärksten Röhrchen befinden sich am Übergang zwischen innerer und mittlerer Zone (TSCHERNE, 1910).

An ihrer Basis werden die soliden Hornzylinder von keratinisierenden epidermalen Zellen fortlaufend nachgebildet. Während diese nachgebildeten Hornzellen im Verlauf der Hornreifung nach distal geschoben werden, schrumpfen die Markzellen und wandeln sich in bröckeligen Zelldetritus um, welcher teilweise aus dem Markraum herausfällt und somit einen bakteriellen Eintritt in den Markraum der Hornröhrchen begünstigt. (BUDRAS et al., 1998). Das Flächenverhältnis von tubulärem (= Hornröhrchen) zu intertubulärem Horn beträgt im Kronhorn 1:2 und das Flächenverhältnis von Röhrchenrinde zu Röhrchenmark der Kronhornröhrchen beträgt im Durchschnitt 40:1 (PELLMANN et al., 1993).

Im Sohlenhorn findet sich ein weiterer Hornröhrchentyp mit vorwiegend spindelförmigen Rindenzellen, die mit ihrer Längsachse quer zum Röhrchenverlauf ausgerichtet sind

(BOLLIGER et al., 1991) und das Ballenhorn besitzt kleine, querovale Röhren, die spiralfederartig in steilen Windungen angeordnet sind (PELLMANN et al., 1993).

Die Form des Röhrenquerschnittes ist Ausdruck für die Richtung der einwirkenden Druck- und Zugkräfte. Bei runden Hornröhren findet eine gleichmäßige Belastung in Längsrichtung, also parallel zur Längsachse des Hornröhrens statt, während querovale Röhren das Resultat von schräg oder senkrecht zur Röhrenlängsachse einwirkenden Druck- und Zugkräften sind (NICKEL, 1938; STASHAK, 1989).



**Textabb. 4:**

**Hornröhren des inneren Kronhornes eines Pferdehufes, HE-Färbung, urspr. Vergr. 62,5x**

- 1. Röhrenmark**
- 2. Röhrenrinde**
- 3. Zwischenröhrenhorn**

### **1.3 Huflederhaut (Corium unguiae, Dermis)**

Die Huflederhaut ist eine direkte Fortsetzung der Dermis der behaarten Haut, welche einen kontinuierlichen Überzug über den gesamten Pferdefuß bildet. Diese zeigt im Huf regionale Modifikationen und wird topographisch genauso wie die Hufoberhaut in fünf Abschnitte eingeteilt: Saum-, Kron-, Wand-, Sohlen- und Strahllederhaut. Die Lederhaut ist ein kollagenes Bindegewebe mit einer Vielzahl an elastischen Fasern (STUMP, 1967) und enthält mehrere Netzwerke aus Blutgefäßen, Nerven (POLLITT, 1998) und Lymphgefäßen (FINDEISEN, 1922). Die Huflederhaut setzt sich aus einem Stratum reticulare und einem Stratum papillare zusammen (FINDEISEN, 1922). Die Aufgaben der gut vaskularisierten Hufdermis bestehen zum einen in der Ernährung der gefäßlosen Epidermis und zum anderen darin, eine feste Verbindung zwischen der Epidermis und dem Innenteil des Hufes, insbesondere mit dem Hufbein, herzustellen (BOLLIGER u. GEYER, 1992; STUMP, 1967). Im Wandsegment ist die Lederhaut Teil des so genannten Hufbeinträgers, da sie hier direkt mit dem Hufbein verbunden ist (BUDRAS u. KÖNIG, 1999; HENKE, 1997; PELLMANN,

1995). Die Huflederhaut formt eine stark vergrößerte Oberfläche – den Lederhautpapillarkörper –, der im Wandsegment aus Lederhautblättchen (Lamellae dermales) sowie terminalen Papillen und in allen anderen Segmenten (nur) aus Lederhautpapillen (Papillae dermales) besteht (BUDRAS u. KÖNIG, 1999). Die etwa 600 primären Lederhautblättchen besitzen auf ihren Seitenflächen wiederum 100 bis 200 Sekundärblättchen (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Die im Bereich der Kronlederhaut befindlichen zahlreichen langen Papillen (POLLITT, 1998) haben eine durch Mikrofalten vergrößerte Oberfläche, und sie sind – genauso wie in den anderen Abschnitten des Hufes – über die Hemidesmosomen der Basalzellfortsätze der Hufepidermis mit dieser fest verzapft (MÜLLING u. BUDRAS, 2002).

### **1.4 Hufunterhaut (Tela subcutanea, Subcutis)**

Die Hufunterhaut besteht aus elastischen und kollagenen Fasern mit dazwischen eingelagertem Fett- und Knorpelgewebe (BUDRAS u. RÖCK, 2004) und sie ist gut innerviert (BOLLIGER u. GEYER, 1992). EGERBACHER und Mitarbeiter (2005) beschreiben hingegen in der Hufunterhaut nur vereinzelte Fettzellen. Im Saum- und Kronsegment formt die Subkutis ein Polster und bildet somit einen Übergang von der behaarten Haut zur modifiziert verhornten Haut des Hufes. Auch im Ballen- und Strahlsegment ist ein ausgeprägtes Subkutispolster entwickelt, das im Strahlsegment Drüsen beherbergt (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Dieses Subkutispolster besitzt eine stoßbrechende Funktion (EGERBACHER, 2005; HABERMEHL, 1996). Ein solches Polster fehlt dagegen im Wand- und Sohlensegment, da hier eine feste Verbindung zwischen den zentralen Stützteilen und der Hornkapsel notwendig ist (BRAGULLA u. BUDRAS, 1997; BUDRAS u. KÖNIG, 1999). So handelt es sich nach HIRSCHBERG und Mitarbeitern (2005) in diesen Segmenten um eine funktionsangepasste Verknöcherung der Unterhaut, die somit eine wichtige Rolle als Element des Stütz- und Trageapparates spielt.



**Textabb. 5:**

**Längsschnitt durch einen Pferdehuf, plastiniertes Präparat (Laboratorium Prof. Budras, Institut für Veterinär-Anatomie, Freie Universität Berlin)**

<b>A</b>	<b>Hufbein</b>	<b>b + c + D</b>	<b>Hufrolle</b>
<b>B</b>	<b>Kronbein</b>	<b>d</b>	<b>Hufgelenk</b>
<b>C</b>	<b>Fesselbein</b>	<b>e</b>	<b>Saumhorn</b>
<b>D</b>	<b>Strahlbein</b>	<b>f</b>	<b>Kronhorn</b>
<b>a</b>	<b>Insertionsstelle der Strecksehne</b>	<b>g</b>	<b>Hufbeinträger</b>
<b>b</b>	<b>Insertionsstelle der tiefen Beugesehne</b>	<b>h</b>	<b>Sohlenhorn</b>
<b>c</b>	<b>Hufrollenschleimbeutel</b>	<b>i</b>	<b>Strahl</b>
		<b>j</b>	<b>Hufballen</b>
		<b>k</b>	<b>weiße Linie</b>



## **2. Hornqualität**

Die Hornqualität – hart, flexibel oder weich und elastisch – ist in den verschiedenen Hufsegmenten unterschiedlich und den lokalen funktionellen Bedürfnissen dieses Zehenendorganes angepasst (FROHNES u. BUDRAS, 2001; MÜLLING et al., 1994 b). Die Umstände, welche zu einer mangelhaften, nicht angepassten Hufhornqualität führen, sind multifaktoriell (REILLY, 1995) und so sind für ein Verständnis der Wechselwirkungen zwischen der Hornqualität und der Struktur des Hufhornes Kenntnisse der zahlreichen, die Hornqualität beeinflussenden Faktoren notwendig. Da in einigen Segmenten eine gewisse Verformbarkeit und Elastizität für den stoßbrechenden Hufmechanismus unerlässlich sind (NAUMANN et al., 1987), darf die Hornqualität nicht mit der Hornhärte gleichgesetzt werden. Horn von guter Qualität kann die Schutzfunktion gegenüber mechanischen, chemischen und mikrobiellen Noxen erfüllen, wohingegen Horn von schlechter Qualität diese Aufgabe nicht erfüllen kann und eine strukturelle Schwachstelle für Erkrankungen der Hufhaut darstellt (FROHNES u. BUDRAS, 2001).

Diese Hornqualität ist von vielen unterschiedlichen endogenen und exogenen Faktoren abhängig, wobei die Bedeutung der einzelnen Faktoren für die Hornqualität nur im Zusammenhang mit den anderen Faktoren verstanden werden kann (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995).

ZENKER (1991) definiert die schlechte Hornqualität des Hufes als sprödes, bröckeliges Horn, Tragrandausbrüche, Risse in der Hornwand und schmieriges Horn im Bereich der weißen Linie und im Strahl.

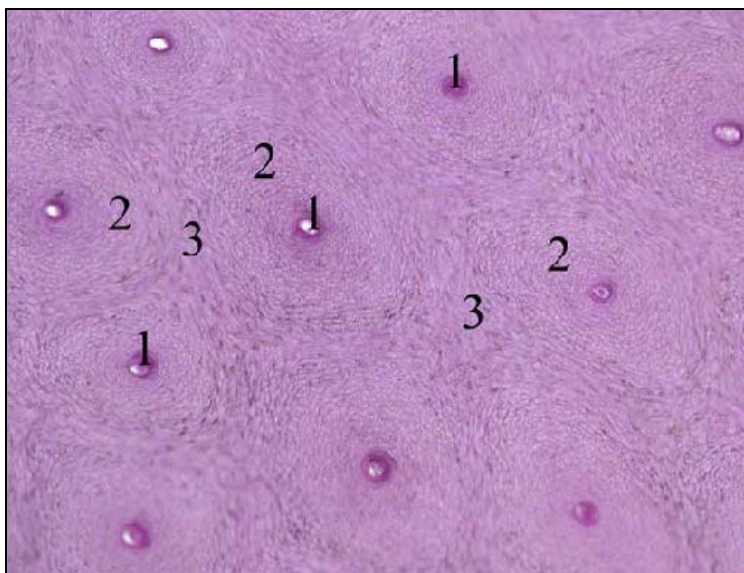
### **2.1 Endogene Einflussfaktoren auf die Hornqualität**

Die endogenen Faktoren, die die Hornqualität der Hufepidermis maßgebend beeinflussen, werden von PELLMANN und Mitarbeitern (1993) unter drei Oberbegriffen zusammengefasst:

- Die *Architektur* des Stratum corneum, also die Anordnung der Hornzellen im Röhren- und Zwischenröhrenhorn, sowie im Blättchenhorn des Wandsegmentes
- *Interzelluläre Faktoren*, d. h., die chemische Zusammensetzung, die Menge und die Verteilung des Interzellularkittes
- *Intrazelluläre Faktoren*, d. h., der Verhornungstyp, die Art, Menge, Anordnung und Vernetzung der Keratinproteine

## Literaturübersicht

Die *Architektur* des Hornzellverbandes wird im Pferdehuf weitestgehend von Hornröhrchen geprägt, welche vom Zwischenröhrchenhorn geflechtartig umgeben sind. Diese Hornröhrchen (Textabb. 6) verlaufen im Kronhorn gerade und parallel in proximodistaler Richtung (PELLMANN et al., 1993) und bestehen aus zentral liegendem Horn (Mark), das von einer Wand (Rinde) umgeben ist (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Die Hornröhrchen sind im Querschnitt rund oder oval, und ihr Markraum besteht aus zerfallenen oder zerfallenden Zellen oder stellt einen Hohlzylinder dar. Die mechanisch stark beanspruchte Rinde besteht aus lagenweise abwechselnd links- und rechtsdrehenden, schraubig gewundenen Zellsträngen. Dieser spiralige Aufbau sorgt für ein höheres Widerstandverhalten als eine einfache horizontale oder vertikale Anordnung (NICKEL, 1938). Damit spiegeln die Hornröhrchen das Material sparende Bauprinzip eines Hohlzylinders wider: größte Festigkeit bei geringem Materialverbrauch (KASAPI u. GOSLINE, 1998). Sie werden vom Stratum germinativum der Epidermis über den Zotten der Lederhaut gebildet, wobei das Zwischenröhrchenhorn von der Epidermis zwischen den Zotten generiert wird. Das Röhrchenmark entsteht direkt über den Spitzen der Lederhautzotten, wobei die Markzellen kurz nach ihrer Bildung bereits wieder zerfallen. Die Röhrchenrinde ist ein Produkt der Epidermiszellen, die sich weiter peripher vom Zentrum der Zottenspitzen und am Seitenteil der Zotten befinden.



**Textabb. 6:**

**Hornröhrchen des inneren Kronhornes, PAS-Färbung, urspr. Vergr. 62,5x**

- 1. Röhrchenmark**
- 2. Röhrchenrinde**
- 3. Zwischenröhrchenhorn**

Im Wandsegment besteht das Hufhorn vorwiegend aus Blättchenhorn, das schon weit proximal am Übergangsbereich vom Kron- ins Wandsegment entsteht (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Das so genannte Kappenhorn, welches über den Firsten der primären Lederhautblättchen gebildet wird (BOLLIGER u. GEYER, 1992; BUDRAS et al., 1989; BUDRAS u. HUSKAMP, 1995; MÜLLING et al., 1994 b), bildet zusammen mit dem

## Literaturübersicht

terminalen Röhrenhorn und dem Blättchenhorn die so genannte weiße Linie (Textabb. 7) (BOLLIGER u GEYER 1992; BUDRAS et al., 1989; BUDRAS u. SCHIEL, 1996; BUDRAS u. RÖCK, 2004). KROON (1915) bezeichnet diese weiße Linie als den Rand, welcher die Hornwand mit dem Außenrand der Sohle verbindet. Die Hornröhren der weißen Linie stellen die größte Schwachstelle des Hufes dar, da diese sehr kurz sind und aufsteigende Keime die empfindliche Lederhaut schnell erreichen können (BUDRAS et al., 1998).

Das Blättchenhorn besteht in der gesamten Semizirkumferenz des Hufes aus mehr als 600 Hornblättchen (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995; BUDRAS et al., 1998; HICKMAN, 1983; POLLITT, 1998). Die Zahl der Primärblättchen ist am Hinterhuf mit durchschnittlich 690 größer als am Vorderhuf mit durchschnittlich 635. Sie stehen im Zehenteil des Hufes am dichtesten beisammen und im Bereich der Eckstreben am weitesten auseinander (KROON u. DE MOULIN, 1929). Die primären Epidermisblättchen stecken zwischen zwei primären Lederhautblättchen und sind an ihrer Basis mit dem Kronhorn verwachsen. Jedes dieser Primärblättchen weist zum Zwecke einer Oberflächenvergrößerung 150 - 200 Sekundärblättchen auf (KAINER, 1989; POLLITT, 1998). Die Funktion dieses Blättchenapparates aus interdigitierenden primären respektive sekundären Epidermis- und Lederhautblättchen besteht in der Verbindung zwischen der Phalanx distalis und der Hufkapsel (BUDRAS et al., 1998) und wird als Hufbeinträger bezeichnet (HENKE, 1997; PELLMANN, 1995). Die Breite der weißen Linie ist ein Indikator für die Funktionsfähigkeit des Blättchenapparates. Sie beträgt im Zehenteil ca. 3,5 mm (BUDRAS u. SCHIEL, 1996) und ist bei einer Hufrehe deutlich verbreitert (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995; KAMEYA et al., 1980). Beim Hauspferd sind die terminalen Hornröhren und die Kappenhornröhren im Zentrum leer. Beim Przewalskipferd ist die weiße Linie dagegen schmaler als beim Hauspferd und die terminalen Röhren sind mit soliden Markzellen gefüllt und sorgen so für eine Barriere gegen aufsteigende bakterielle Keime. Diese Barriere ist somit beim Przewalskipferd besser ausgebildet als beim domestizierten Pferd (BUDRAS u. SCHIEL, 1996).

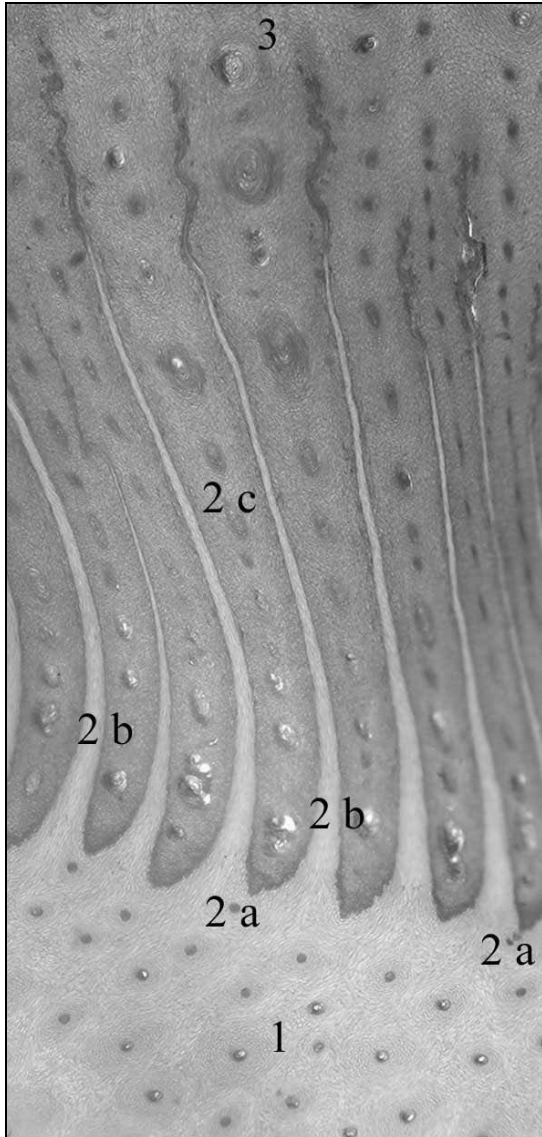
Nach TSCHERNE (1910) zeigt Horn von tadelloser Beschaffenheit ein festes Gefüge, die Röhren haben einen engen Markraum und eine kräftige Rinde, wobei die Röhren eng zusammenstehen. Weiterhin beschreibt der Autor das Horn von mangelhafter Beschaffenheit, bei welchem die Rinde ohne merkliche Grenze in das Zwischenröhrenhorn übergeht und die Hornröhren einen weiten Markraum aufweisen.

Die Dicke der Röhrenrinde und der Durchmesser des Markraumes beeinflussen die Stabilität eines Hornröhrens und somit maßgeblich die Hornqualität (BRAGULLA et al., 1994). Intakte Markzellen sind für die Aufrechterhaltung einer Barriere gegen eine

## Literaturübersicht

aufsteigende bakterielle Keimbesiedlung wichtig (BUDRAS u. SCHIEL, 1996). Die Qualität des Hufhornes wird so durch seine Mikroarchitektur beeinflusst (DIETZ u. PRIETZ, 1981). KÜNG (1991) nimmt die Röhrenchenzahl pro Flächeneinheit im Kronhorn als Parameter zur Bestimmung der Hornqualität, d. h. je größer die Anzahl der Röhren pro Flächeneinheit, desto dicker die Rinde und desto kleiner der Markraum und umso stabiler das Horn (DIETZ u. PRIETZ, 1981). Das Kronhorn besitzt wenige große, runde Röhren mit einer dicken Rinde, die für eine hohe Festigkeit und Stabilität sorgen. Das Ballhorn hingegen zeichnet sich durch zahlreiche dünne, querovale Röhren mit schmaler Rinde und einem großen Anteil an Zwischenröhrenhorn aus. Diese Struktur sorgt für eine geringere Festigkeit, aber im Gegenzug für eine hohe Flexibilität. Die Dicke der Röhrenrinde, der Durchmesser der Röhren und das Verhältnis von Röhrenhorn zu Zwischenröhrenhorn sind also maßgeblich für die Härte des Hornes (DIETZ u. PRIETZ, 1981).

Diese Architektur des Hornzellverbandes wird wiederum durch die Anzahl und die Form der Lederhautpapillen bestimmt. Bei Verhornungsstörungen kommt es vielfach zu einer Erhöhung der Röhrenanzahl mit stark variierenden Durchmessern, verbunden mit einer Zunahme an bröckeligem, weichem Markhorn (BRAGULLA u. MÜLLING, 1997). Auch nach MAUSKE (1972) und SCHRÖDER (1970) wird die Hornqualität unter anderem durch den histologischen Aufbau und die sich dadurch ergebenden physikalischen Eigenschaften beeinflusst. ZENKER (1991) beschreibt bei schlechter Hornqualität folgende histologischen Befunde: Mikrorisse und erweiterte Markräume im Kronhorn und im Terminallagenhorn sowie eine Ablösung des Terminal(lagen)hornes von den Hornblättchen. Diese Mikrorisse treten meist in Tragrandnähe auf, wo das Horn höheren Belastungen ausgesetzt ist. Brüchiges Horn in Tragrandnähe weist einen fast vollständigen Verlust der tubulären Strukturen im mittleren und inneren Kronhorn auf (KEMPSON, 1987). Eine besondere Prädilektionsstelle für Hufhornveränderungen findet sich im Übergangsbereich von mittlerem zu innerem Kronhorn. Hier zeigen sich häufig Risse am Übergang von Röhrenrinde ins Zwischenröhrenhorn und am Übergang von innerem zu mittlerem Kronhorn. Oberflächen-nahe Mikrorisse in den ersten vier Zellschichten sind dagegen Ausdruck eines normalen Abschilferungsprozesses des Hufhornes (ZENKER, 1991).



**Textabb. 7:**  
**Histologisches Bild einer Hornprobe**  
**eines Pferdehufes im Querschnitt,**  
**Zehenrückenteil, PAS-Färbung,**  
**urspr. Vergr. 31,25x**

- 1.**                **inneres Kronhorn**
- 2 a.**            **Kappenhornröhrchen**
- 2 b.**            **Hornblättchen**
- 2 c.**            **Terminalhorn**
- 2 a + b + c**    **weiße Linie**
- 3.**                **Sohlenhorn**

Der bedeutsamste *interzelluläre Faktor* ist der glykoprotein- und glycolipidreiche Interzellularkitt (Membrane Coating Material, MCM), welcher für den Zusammenhalt im Hornzellverband sorgt (BUDRAS u. BRAGULLA, 1991; MÜLLING et al., 1994 a; MÜLLING u. BUDRAS, 1998; PELLMANN et al., 1993). So wird die mechanische Festigkeit des Hornzellverbandes auch maßgeblich durch die Art und Menge der im Interzellularkitt vorkommenden Glykoproteine geprägt (HASHIMOTO et al., 1992). Der Interzellularkitt wird vom rauen endoplasmatischen Retikulum und vom Golgi-Apparat synthetisiert (ANTHAUER, 1996; FROHNES u. BUDRAS, 2001). Dabei produzieren die unteren Schichten des epidermalen Stratum spinosum (keratinisierende Stachelzellen der Epidermis) die sogenannten Membrane Coating Granules, welche den Interzellularkitt enthalten. Dieser wird dann in den oberen Schichten, nahe der Verhornungsgrenze, nach dem Prinzip der Exozytose in den Interzellularspalt ausgeschleust (BUDRAS u. HUSKAMP,

## Literaturübersicht

1995; HAYWARD, 1979; MÜLLING et al., 1994 a; MÜLLING u. BRAGULLA, 1997; MÜLLING u. BUDRAS, 1998). Weitere bedeutende Funktionen dieser Kittsubstanz sind das Aufrechterhalten einer semipermeablen Barriere im Hufhorn und die lysosomale Funktion durch seinen Gehalt an Hydrolasen. (BUDRAS u. BRAGULLA, 1991). Vor allem im Ballensegment fungiert der Interzellularkitt aufgrund seines Lipid- bzw. Phospholipidanteiles als Barriere gegen Wasserverluste oder das Eindringen von Wasser (FROHNES, 1999; HAYWARD, 1979; LANDMANN, 1988). BUDRAS und Mitarbeiter (1989) sowie MÜLLING und BUDRAS (1998) weisen auf die Funktion des Interzellularkittes als Barriere gegen das Eindringen von Bakterien hin. Hufhorn von guter Qualität zeigt auch nach längerem Einweichen in Wasser keinerlei Veränderungen im Bereich dieser Permeabilitätsbarriere, wohingegen brüchiges Hufhorn einen Anstieg der Permeabilität aufweist. Somit besitzt Horn von schlechter Qualität eine schwächere Permeabilitätsbarriere als Horn von guter Qualität (KEMPSON u. CAMPBELL, 1998).

Lebende und verhornende Zellen der Hufoberhaut sind über fingerförmige Zellfortsätze miteinander verzahnt, welche über Zellkontakte (z. B. Desmosomen) verbunden sind. Diese werden im Stratum corneum durch den Interzellularkitt, der in den verschiedenen Hufsegmenten unterschiedlich zusammengesetzt und verteilt ist, ersetzt oder ergänzt (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995). Die desmosomalen Zellkontakte werden mit fortschreitender Verhornung am Übergang zum Stratum corneum durch Enzyme, wie z. B. die saure Phosphatase der Membrane Coating Granules, abgebaut, um ein Abschliffen der Hornzellen zu ermöglichen (HASHIMOTO et al., 1992; HAYWARD, 1979).

Ein unterschiedliches histologisches Färbeverhalten der Zellverbindungen in den verschiedenen Segmenten des Pferdehufes weist ebenfalls auf eine unterschiedliche Zusammensetzung der Interzellularkittsubstanz hin. Die qualitativen und quantitativen Unterschiede im Kohlenhydratgehalt des Interzellularkittes korrelieren mit den verschiedenen mechanischen Eigenschaften des Hufhornes (HASHIMOTO et al., 1992). Der Interzellularkitt zwischen den Rindenzellen der Hufhornröhrchen und den Zwischenröhrchenhornzellen ist gleichmäßig eng, während zwischen den Markzellen im Hornröhrchen blasige Ansammlungen des Interzellularkittes vorliegen. Im Kronhorn herrscht eine unverschiebbare, feste Verbindung der Hornzellen durch eine geringe, aber gleichmäßig verteilte Menge des Interzellularkittes vor (PELLMANN et al., 1993), welcher hier eine amorphe, feinkörnige Ultrastruktur aufweist (BUDRAS et al., 1989). Im Ballenhorn ist diese Verbindung durch große, aber unregelmäßig verteilte Mengen des Interzellularkittes flexibel (MÜLLING et al. 1992 a, b; PELLMANN et al., 1993). Bei Veränderungen der Qualität und Quantität des

## Literaturübersicht

Interzellularkittes zeigen sich häufig aufgrund eines mangelhaften Zusammenhaltes durch den Interzellularraum verlaufende Hornspalten (BUDRAS u. GEYER, 1989; BUDRAS u. BRAGULLA, 1991). Im gesunden und auch im kranken Horn führen Risse fast immer durch den Interzellularspalt und die dort liegende Kittsubstanz. Folglich ist für die Qualität des Hornzellverbandes der Interzellularkitt in gleichem Maße bedeutsam wie die Zelle selber (BUDRAS u. BRAGULLA, 1991). Im Falle einer Hufrehe und dem Auftreten von Hornspalten wird der Interzellularkitt vermehrt, aber von minderer Qualität gebildet (BUDRAS u. GEYER, 1989; MARKS u. BUDRAS, 1987)

Die wichtigsten *intrazellulären Faktoren* sind die amorphen Keratin-assoziierten Proteine und die filamentären Keratinproteine, die zusammen die Hornzelle stabilisieren und die Zytoarchitektur der Hornzelle beeinflussen (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995; MÜLLING et al., 1994 b; PELLMANN et al., 1993). Sie sind ein Produkt eines gewebetypischen Differenzierungsprozesses, der Keratinisierung und anschließenden Verhornung (PELLMANN et al., 1993). Die Keratinfilamente werden von fibrillären Proteinen aus Ketten verschiedener Aminosäuren aufgebaut (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995). Die Keratine im harten Kronhorn besitzen meist ein hohes Molekulargewicht und sind das Endprodukt einer Differenzierung, die als harte Verhornung bezeichnet wird. Das Ballensegment und das Saumsegment besitzen hingegen weiche, elastische Hornzellen, ein Produkt der so genannten weichen Verhornung, welche durch die Synthese von speziellen keratinfilament-assoziierten Proteinen gekennzeichnet ist, die in Form von Keratohyalingranula vorübergehend als Makromoleküle gespeichert und an der Verhornungsgrenze enzymatisch in Monomere zerlegt werden. In diesen Segmenten sind die Keratinfilamente aus Proteinketten mit niedrigem Molekulargewicht aufgebaut (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995). PELLMAN und Mitarbeiter (1993) teilen die Keratine zum Zwecke einer besseren Vergleichbarkeit nach ihrem Molekulargewicht in Kilodalton (kDa) in drei Gruppen ein:

- schwere, langkettige Keratine (60 - 68 kDa)
- mittelschwere, mit mittlerer Kettenlänge (52 - 60 kDa)
- leichte, kurzkettige (45 - 52 kDa)

Schwere, langkettige Keratine finden sich im Zwischenröhrchenhorn und in der Röhrchenrinde des Kronhornes, wohingegen sich die leichten und mittelschweren Keratine in großer Menge in den inneren Rindenzellen und im Röhrchenmark des Kronhornes und im gesamten Horn des Ballensegmentes befinden. Im Kronhorn finden sich langkettige, schwere Zytokeratine, welche – regelmäßig in Bündeln angeordnet – eine hohe Festigkeit des

## Literaturübersicht

Kronhornes garantieren. Die im Ballenhorn vorkommenden kurz- und mittellangkettigen Keratinproteine formen ein unregelmäßiges Netzwerk und ermöglichen dadurch eine gewisse Verformbarkeit des Hornes (PELLMANN et al., 1993).

In den Zellen des Blättchenhornes des Wandsegmentes liegen parallel angeordnete Hornbälkchen vor, die aus Keratinfilamenten und keratinfilament-assoziierten Proteinen bestehen. Im Röhrenchorn sind diese Hornbälkchen dreidimensional angeordnet und halten somit Druckkräften aus verschiedenen Richtungen stand (PATAN u. BUDRAS, 2003 a).

Das Fehlen bestimmter segmentspezifischer Zytokeratine bei Verhornungsstörungen ist ein Merkmal für intrazelluläre Störungen, meist auf Grund von Ernährungsfehlern (PELLMANN et al., 1993).

Ein weiterer wichtiger intrazellulärer Faktor ist der Umfang der Verknüpfung der Keratinfilamentproteine und assoziierten Proteine durch Disulfidbrücken. Im Kronsegment weisen die Keratinproteine im noch nicht voll ausgereiften jungen Kronhorn überwiegend Sulfhydrylgruppen (die Vorstufen der Disulfidbrücken) auf, wohingegen die Disulfidbrücken im distal gelegenen reiferen Kronhorn dominieren. Folglich wird die Festigkeit der Hornzelle entscheidend durch die Keratinproteine und die sie vernetzenden Disulfidbrücken bestimmt (PELLMANN et al., 1993). In den Keratinproteinen des Kronhornes und der Sohle verleiht die Vernetzung der Keratinfilamente über zahlreiche Disulfidbrücken diesen Segmenten eine hohe Festigkeit. Im Gegensatz dazu enthält das Horn der weißen Linie und des Strahles zahlreiche freie Sulfhydrylgruppen und somit eine geringere Festigkeit (BRAGULLA et al., 1994). BERTRAM und GOSLINE (1987) geben auch die nicht kovalenten Bindungen, vor allem Wasserstoffbrückenbindungen, als bedeutsamen Faktor für die Stabilität der Keratinfilamentbündel und damit für die des Zytoskelettes in der verhornenden Zelle an. Diese werden vom Wassergehalt der Zelle beeinflusst, weshalb bei einem hohen Wassergehalt des Hufhornes die Anzahl dieser Bindungen und somit die Stabilität der Hornzelle herabgesetzt ist.

Ein zusätzlicher, die Hornqualität beeinflussender intrazellulärer Faktor ist das so genannte marginale Band, das auch als cornified envelope oder marginal band bezeichnet wird. Dieses ist eine Hülle aus Proteinen auf der Innenseite der Hornzellmembran, welche durch Disulfidbrücken stabilisiert wird und ebenfalls Einfluss auf die Festigkeit der Zelle ausübt (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995; MÜLLING et al., 1999). Am Ende der Verhornung wird es als eine Verstärkung an der Zellmembrannenseite aus verschiedenen Proteinen gebildet und verleiht so der Hornzelle mechanischen Schutz und fungiert außerdem als Barriere gegen mögliche mikrobielle Angriffe (PATAN u. BUDRAS, 2003 a).



## Literaturübersicht

Ein weiterer *endogener Einflussfaktor* für die Hornqualität ist die *genetische Disposition* des Tieres (BAGGOTT, 1982; JOSSECK et al., 1995; LEY et al., 1998). Nach TSCHERNE (1910) sind nicht nur einzelnen Pferden, sondern ganzen Pferderassen Hufe mit mangelhafter Hornqualität eigen und er betont, dass die Hornqualität bereits von Geburt an stark variieren kann. JOSSECK (1991) und ZENKER (1991) bestätigen den genetischen Einfluss auf die Hornqualität bei Lipizzanerpferden und weisen auf das sehr seltene Vorkommen von Lipizzanerpferden mit qualitativ guten Hufen hin. JOSSECK (1991) rät aus diesem Grunde davon ab, Pferde mit mittel- bis schwergradigen Hufhornveränderungen zur Zucht einzusetzen. Auch BAGGOTT (1982) und EUSTACE (1994) raten zum Ausschluss solcher Tiere von der Zucht. Des Weiteren vermutet PATAN (2001) die genetisch bedingte Hornqualität bei den von ihr untersuchten Przewalskipferden. Auch bei Milchrindern besteht eine genetische Disposition bei verminderter Hornqualität für bestimmte Klauenerkrankungen (BAGGOTT, 1982) und eine genetisch festgelegte Hornröhrchenzahl und -größe (DIETZ u. PRIETZ, 1981). So setzt sich die Hornqualität des Rindes zu 38 % aus genotypischen und zu 62 % aus umweltbedingten Faktoren zusammen (DIETZ u. PRIETZ, 1981).

Ferner scheint sich die Hornqualität mit zunehmendem *Alter* der Tiere zu verschlechtern, wobei als Grund die Tatsache genannt wird, dass die Hornbildungsrate bei älteren Pferden herabgesetzt ist und deshalb Veränderungen der Hornkapsel länger sichtbar sind. Somit ist die Dauer der Ausheilung von Hufhorndefekten bei älteren Pferden im Vergleich zu jüngeren Tieren erhöht (JOSSECK, 1991). Im Widerspruch zu ihrer Aussage, dass die Hornröhrchenzahl und -größe genetisch determiniert sei, geben DIETZ und PRIETZ (1981) zusätzlich an, dass mit zunehmendem Alter der Tiere auch die Anzahl der Hornröhrchen pro Flächeneinheit sinkt, wobei gleichzeitig der Röhrchendurchmesser ansteigt. PATAN (2001) findet allerdings keinen Einfluss des Alters und des Geschlechtes der Wildpferde auf die durch die Röhrchenarchitektur bedingten mechanischen Eigenschaften des Hufhornes.

DIETZ und PRIETZ (1981) sehen weiterhin einen Einfluss der *Pigmentierung* des Hornes auf dessen Qualität. So soll helles, unpigmentiertes Horn im Allgemeinen widerstandsfähiger sein als dunkles, pigmentiertes Horn und zudem höhere Härtegrade aufweisen (HEPBURN et al., 2004).

## 2.2 Exogene Einflussfaktoren auf die Hornqualität

Zu den exogenen Einflussfaktoren auf die Hornqualität des Hufes zählen die aus der Umwelt auf das Horn einwirkenden Faktoren (MÜLLING, 1993) und die in unterschiedlicher Qualität und Quantität dem Tier zugeführten Nährstoffe (MÜLLING u. BUDRAS, 1998).

### *Umwelteinflüsse:*

Die *Stallhygiene* und die *Haltungsbedingungen* sind von entscheidender Bedeutung für die Hornqualität, da Harnstoff oder eine Mischung von Urin, Kot und Einstreu zu einer Minderung der Hornqualität führen (BUDRAS u. SCHIEL, 1996). BUDRAS und Mitarbeiter (1998) heben als die wichtigste Maßnahme zur Verbesserung der Hornqualität die Optimierung der Stallhygiene hervor. ALBARANO und WARZECHA (1994) beschreiben den Einfluss von Haltungsbedingungen auf die Hornqualität bei Pferden, Rindern und Schweinen, wonach die Zugfestigkeit des Hornes und die Hornhärte durch Urin und Kot um bis zu 20 % herabgesetzt werden. Bei Horn von schlechter Qualität ist das Röhrenmark für eine chemische Zersetzung durch Bestandteile von Mist und Boxeneinstreu anfällig und bietet eine ideale Eintrittspforte für Bakterien (FROHNES u. BUDRAS, 2001). Ein Urin- und Kotgemisch vermindert zwar die Zugfestigkeit des Hornes, wobei Ammoniak alleine aber keine solche Verminderung hervorruft (KÜNG, 1991). MÜLLING (1993) untersuchte die Wirkung von Gülle und Harnstoff auf die Hornstruktur von Rinderklauen. Der Interzellularkitt zwischen den Hornzellen wird durch Gülle in hohem Maße herausgelöst, wobei zudem der Harnstoff die Keratinproteine aus den angegriffenen Hornzellen löst und so der Aufstieg für Infektionserreger zusätzlich erleichtert wird (BUDRAS et al., 1998; MÜLLING, 1993). Bakterielle Invasionen können so zur Zerstörung des Röhrenmarkes führen, es entstehen Hohlzylinder und somit eine Prädisposition für eine weitere Keimbesiedlung. Dieses ist häufig im Bereich der weißen Linie zu beobachten (BUDRAS u. SCHIEL, 1996). KEMPSON (1987) und SCHMITT (1998) geben an, dass eine bakterielle Besiedlung des Hornes erst sekundär nach einer Vorschädigung des Hufhornes mit nachfolgender Zellablösung stattfindet. Gesundes Hufhorn bleibt durch anhaltende Trockenheit, Schlamm oder schlechte Einstreu unbeeinflusst, wohingegen Horn von schlechter Qualität diesen Umwelteinflüssen viel stärker ausgesetzt ist (EUSTACE, 1994; KEMPSON, 1990). Je feuchter das Horn ist, desto höher ist auch die Intensität des Hornzerfalles. Ein solcher Zerfall ist häufig schon mit bloßem Auge als schwarz-glänzende Verfärbung sichtbar (BUDRAS et al., 1998).

Zudem wird der Wassergehalt des Hufhornes durch die Haltungs- und Umweltbedingungen beeinflusst. Beispielsweise führen feuchte Einstreu, trockene und sandige Weiden oder feuchte Wiesen bei Arabischen Vollblütern in unseren Breitengraden zu weichem, bröckeligem Hufhorn. Dagegen weisen diese Pferde harte, widerstandsfähige Hufe auf, wenn sie in ihrer natürlichen trockenen Umgebung gehalten werden (ANTHAUER, 1996).

### *Saisonale Einflüsse:*

Das Hufhorn, welches in der wärmeren Jahreszeit gebildet wurde, lässt eine schlechtere Qualität erkennen als Horn, dessen Bildungszeitpunkt in der kühleren Jahreszeit liegt (KÖNIG, 2001; LEU 1987; SPITZLEI, 1996). Bei dem so genannten Sommerhorn ist der Interzellularspalt meist blasenförmig erweitert und nur unvollständig mit Kittsubstanz gefüllt und es sind insgesamt weniger Desmosomen erkennbar. Ferner ist die Anzahl der Hornröhrchen pro Flächeneinheit im Sommerhorn niedriger als im Winterhorn (KÖNIG, 2001; PATAN u. BUDRAS, 2000; PATAN, 2001), wohingegen DIETZ und PRIETZ (1981) eine genetische Determinierung der Hornröhrchenzahl pro Flächeneinheit beschreiben. Im Sommer gebildetes Horn weist überdies einen weiteren Markraum der Hornröhrchen auf und bildet so eine Prädilektionsstelle für den Eintritt von keratolytischen und mikrobiellen Noxen (KÖNIG, 2001). Im Winter gebildetes Horn ist härter, zeigt nur vereinzelt interzelluläre Mikrorisse und besitzt einen besseren mechanischen Zusammenhalt. Am Ende der Sommermonate findet SCHMITT (1998) ein gehäuftes Auftreten von Rissen im trockenen Hufhorn. Aus diesen Gründen ist von einer verminderten Hornqualität des Sommerhorns im Vergleich zum Winterhorn auszugehen (PATAN u. BUDRAS, 2000). JOSSECK (1991) und LEU (1987) beobachten eine verringerte Hornbildungsrate in den Wintermonaten. Auch HAHN und Mitarbeiter (1986) bezeichnen die Hornbildungsrate als zyklisch, mit den höchsten Hornbildungsraten im Spätherbst und im Frühsommer und den geringsten in den Wintermonaten. CLARK und RAKES (1982) sowie VERMUNT (1990) begründen dieses mit den jahreszeitlichen Unterschieden der Tageslichtlänge, wobei HAHN und Mitarbeiter (1986) diese Schwankungen auf die Umgebungstemperatur zurückführen. MAC CALLUM und Mitarbeiter (2002) gehen von einer höheren Zellproliferation und Proteinsynthese im Sommer aus, wobei die Hornbildungsrate nicht direkt mit der Rate der Zellproliferation korreliert ist. Die Autoren stellen aber eine geringe positive Korrelation zur Keratinisierungsrate fest. Zudem variieren das Vorkommen und die Menge einiger Keratine stark in Abhängigkeit von der Jahreszeit (DISTL et al., 1982). Auch wird die epidermale Proliferation und somit die Rate der Hornbildung durch Hormone beeinflusst, deren Konzentration wiederum von der

## Literaturübersicht

Tageslichtlänge abhängt. So beeinflusst die Tageslichtlänge den Prolaktinspiegel. Dieses Hormon, welches in der Hypophyse gebildet wird, hat eine stimulierende Wirkung auf die Hornbildungsrate (LINCOLN u. RICHARDSON, 1998). Diese saisonalen Unterschiede in der Hornbildungsrate können allerdings auch durch eine Alteration der Blutzufuhr zum Huf begründet sein. Unter extrem kalten Umweltbedingungen kommt es zwangsläufig zu einer Konstriktion der Arteriolen und Dilatation der arteriovenösen Anastomosen in der Huflederhaut und somit zu einer Umverteilung von Blut auf die venöse Seite. Somit werden die keratinisierenden und verhornenden Zellen inadäquat mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt, was wiederum zu einer verlangsamten Hornbildungsrate führt (VERMUNT, 1990). Bei Schafen verringerte sich nach Verbringen der Tiere von einer warmen in eine kalte Umgebung die Hornbildungsrate in den Klauen. Es wird vermutet, dass die Hornbildungsrate maßgeblich von der Klauentemperatur abhängt, die wiederum durch den Blutfluss im Klauenbereich beeinflusst wird (WHEELER et al., 1972). Dieser Blutfluss im Pferdehuf wird außerdem durch die Bewegungsaktivität des Pferdes beeinflusst (LEU, 1987). SCHREYER (1997) und WINTZER (1986) begründen die Verringerung der Hornbildungsrate im Winter mit einer Änderung des Nahrungsangebotes, einer Verringerung der Umgebungstemperatur und einer reduzierten Bewegungsaktivität der Tiere. Auch PATAN und BUDRAS (2000) sowie PATAN (2001) verzeichnen beim Przewalskipferd die größte Hornproduktion im Sommer, wo die höchste Bewegungsaktivität der Pferde zu beobachten ist.

HIDIROGLOU und WILLIAMS (1986) beschreiben einen saisonalen Einfluss von Kalzium, Magnesium, Zink und Kupfer auf die Hornqualität. In den Wintermonaten kommt es zu einem Abfall der Konzentrationen dieser Mineralstoffe bzw. Spurenelemente im Hufhorn, ohne dass gleichzeitig eine Futterumstellung stattgefunden hat. Bezüglich des Schwefelgehaltes sind keine saisonalen Unterschiede zu beobachten. HAHN und Mitarbeiter (1979) weisen ebenfalls auf die Abnahme der Kalzium-, Magnesium-, Zink- und Kupferkonzentration im Horn in den Wintermonaten ohne zeitgleiche Futterumstellung hin. Daneben existieren Unterschiede in der Aminosäurekonzentration zwischen Sommer- und Winterhorn (BODUROV et al., 1982). Im Hinblick auf die physikalischen Eigenschaften des Hornes beschreiben MAC CALLUM und Mitarbeiter (2002) einen höheren Härtegrad im Sommer als in den Wintermonaten. KÖNIG (2001) konnte dagegen keine Abhängigkeit der Hornhärte von der Jahreszeit der Hornbildung feststellen.

Bezüglich des Wassergehaltes im Hufhorn von Przewalskipferden sind nur geringe saisonale Unterschiede festzustellen (PATAN, 2001).

## Literaturübersicht

Nach SCHNITKER (2004) kommt es bei in Semireservaten lebenden Przewalskipferden zu saisonal bedingten Unterschieden der Hufform. So weisen diese Tiere aufgrund eines Selbstregulierungsmechanismus ihrer Huflänge im Sommer einen größeren Vorderwandwinkel und eine geringere Zehenrückenlänge auf als in der kalten Jahreszeit.

### *Wassergehalt und Hornhärte:*

In der Epidermis existiert eine effektive Barriere gegen das Eindringen von Wasser und wasserlöslichen Substanzen (ELIAS u. FRIEND, 1975), wobei die am wenigsten permeable Schicht das Stratum corneum darstellt (SCHEUPLEIN u. BLANK, 1971). Sowohl die Haltungsbedingungen als auch saisonale Faktoren nehmen Einfluss auf den Wassergehalt des Hornes. Die mechanischen Eigenschaften des Hufhornes werden wiederum im Wesentlichen vom Wassergehalt bestimmt: Mit abnehmendem Wassergehalt steigt die Hornhärte an (BERTRAM u. GOSLINE, 1987; DOUGLAS, 1997; NAUMANN et al., 1987; PATAN u. BUDRAS, 2003 b; SPITZLEI, 1996; STERN, 2000; ZENKER, 1991).

Der Wassergehalt wird wiederum durch die Mikroarchitektur und biochemische Zusammensetzung des Hufhornes beeinflusst. Je geringer der Anteil des Röhrenhornes, also je mehr Zwischenröhrenhorn vorhanden ist, desto höher ist auch das Wasseraufnahmevermögen (DIETZ u. PRIETZ, 1981). Das härteste Horn bei physiologischem Wassergehalt ist das äußere und mittlere Kronhorn. Der physiologische Wassergehalt, der im äußeren und mittleren Kronhorn am geringsten ist, ist damit also negativ korreliert. Diese Korrelation ist im Sohlen- sowie Strahlsegment und in der weißen Linie weitaus weniger deutlich ausgeprägt (PATAN u. BUDRAS, 2003 b). Sehr trockenes oder feuchtes Hufhorn besitzt eine geringe Elastizität (BERTRAM u. GOSLINE, 1987; DOUGLAS et al., 1996; LEACH u. ZOERB, 1983), wohingegen Horn mit einem mittleren Wassergehalt durch eine gewisse Elastizität zusammen mit einer hohen Festigkeit eine optimale Belastungsfähigkeit zeigt (BERTRAM u. GOSLINE, 1987). Bei einem geringen Wassergehalt wird im Hufhorn eine Vielzahl an Wasserstoffbrückenbindungen ausgebildet. Dies führt zu einer Erhöhung der Festigkeit innerhalb der Hornzelle. Bei einem hohen Wassergehalt ist die Stabilität der Keratinfilamentbündel im Zytoskelett der Hornzellen durch eine geringere Anzahl an Wasserstoffbrückenbindungen verringert (BERTRAM u. GOSLINE, 1987). Laut SPITZLEI (1996) sowie COENEN und SPITZLEI (1997) besitzt minderwertiges Horn eine höhere Feuchtigkeit und geringere Härte als intaktes Horn. Jedoch ist eine hohe Hornhärte nicht unbedingt mit einer guten Hornqualität gleichzusetzen, da hartes Horn oft auch eine spröde Konsistenz aufweist (ZENKER, 1991). Sowohl Feuchtigkeit als auch Austrocknung können

## Literaturübersicht

das Hufhorn verändern (TSCHERNE, 1910), wobei eine feuchte Umgebung den Huf erweicht und ihn für Erosionen anfällig macht (BAGGOT, 1982; LEACH u. ZOERB, 1983), während eine vermehrte Austrocknung zur Brüchigkeit des Hornes führt (BAGGOT, 1982). BERTRAM und GOSLINE (1987) beschreiben ein gehäuftes Auftreten von Hornspalten bei extrem trockenen bzw. extrem feuchten Hufen im Unterschied zu Hufhorn mit einem physiologischen Wassergehalt. Ein solches Wechselspiel von Trockenheit und Feuchtigkeit führt bei prädisponierten Hufen zu starken Hornschäden (SPITZLEI, 1996).

Das Horn in den verschiedenen Segmenten des Pferdehufes besitzt gemäß seiner mechanischen Eigenschaften unterschiedliche Wassergehalte und Härtegrade (FROHNES, 1999; PATAN u. BUDRAS, 2003 b; SPITZLEI, 1996; STUMP, 1967). Angepasst an die lokale Belastung des Pferdehufes bei der Fußung differiert die Festigkeit des Hornschuhs in den verschiedenen Segmenten: Kronhorn und Sohlenhorn sind hart, weiße Linie, Ballen- und Strahlhorn sind weich-elastisch (PELLMANN et al., 1993). Der Feuchtigkeitsgradient der einzelnen Hufsegmente wird durch den jeweiligen Abstand zur Huflederhaut bestimmt. Hufhorn in unmittelbarer Nähe der Lederhaut besitzt einen hohen Feuchtigkeitsgehalt, da in diesem Bereich fortwährend Flüssigkeit aus der gut durchbluteten Lederhaut in die Epidermis diffundiert. So nimmt mit zunehmender Entfernung zur Lederhaut die Diffusionsstrecke zu und der Wassergehalt innerhalb der Hufplatte ab (BERTRAM u. GOSLINE, 1987). Auch im Bezug auf die Wasseraufnahme und -abgabe ist ein typisches segmentspezifisches Muster zu erkennen: Das Saumhorn, das innere Kronhorn und die weiße Linie zeichnen sich durch eine besonders schnelle Wasseraufnahme aus. In diesem Hufhorn findet aber auch eine schnelle Wasserabgabe statt, was durch eine sehr geringe Wasserspeicherfähigkeit in diesen Segmenten bedingt ist. Im Sohlen-, Ballen- und Strahlhorn findet die Wasseraufnahme eher langsam statt. Allerdings besteht in diesem Segment eine hohe Aufnahmekapazität. Das Ballen-Strahlsegment nimmt aber durch seine langsame Abgabe von Wasser eine Sonderstellung ein und weist somit die höchste Wasserspeicherkapazität auf. Das harte, äußere Kronhorn ist durch eine geringe Wasseraufnahmekapazität gekennzeichnet, wobei hier allerdings auch die Wasserabgabe an die Umgebung langsam stattfindet, so dass daraus ein bedeutender Speichereffekt resultiert (PATAN u. BUDRAS, 2003 b).

Der Lipidgehalt des Hufhornes ist ein weiterer Faktor, der die Hornhärte bestimmt. Daher ist die Härte des Hufhornes nicht proportional zum Feuchtigkeitsgehalt, sondern wird auch vom Gehalt an intrazelluläre Lipiden beeinflusst. Zudem schützt der Interzellularkitt den Huf aufgrund seines Lipidgehaltes vor Austrocknung (ELIAS u. FRIEND, 1975). Im weichen Horn des Ballen-Strahlsegmentes sind viele inter- und intrazelluläre Lipidtröpfchen

## Literaturübersicht

vorhanden, wohingegen das harte Horn der Sohle einen nur geringen Fettgehalt aufweist (FROHNES u. BUDRAS, 2001). Im Saumhorn existieren im lipidreichen Interzellularrspalt tropfenförmige Erweiterungen, wodurch dieses Segment eine hohe Wasserspeicherkapazität besitzt. Außerdem beeinflusst der Wassergehalt nicht nur die Materialeigenschaften des Saumhornes selbst, sondern auch die Hornqualität des unterlagernden äußeren Kronhornes. Das Saumhorn wirkt wie ein „Feuchtigkeitspflaster“ auf das Kronhorn, welches im Zuge der Keratinisierung und Verhornung einen optimalen Feuchtigkeitsgehalt benötigt (BUDRAS et al., 2002). Die Hornzellen des inneren Kronhornes besitzen eine schwammartige Struktur und speichern in ihren spongiösen Hohlräumen Wasser. Diese Wasserspeicherung erfolgt an bzw. in den Zytokeratinen, den keratinfilament-assoziierten Proteinen und im Interzellularkitt (PATAN u. BUDRAS, 2003 a). Ein Unterschied von Wassergehalt und Hornhärte besteht zwischen Vorder- und Hinterhufen nicht (HINTERHOFER et al., 2001; MIYAKI et al., 1974). Allerdings konnten MIYAKI und Mitarbeiter (1974) Unterschiede im Wassergehalt bezüglich des Alters, der Rasse und des Geschlechtes der Pferde feststellen. Demnach weisen Stuten einen geringeren Wassergehalt der Hufwand als Wallache und Hengste auf. Einen Unterschied zwischen pigmentierten und unpigmentierten Hufen konnten CLARK und RAKES (1982), DOUGLAS und Mitarbeiter (1996), LANDEAU und Mitarbeiter (1983) sowie MIYAKI und Mitarbeiter (1974) dagegen nicht bestätigen. Hingegen soll laut HEPBURN und Mitarbeitern (2004) unpigmentiertes Horn signifikant höhere Härtegrade aufweisen als pigmentiertes Horn. Auch existieren spezies- und rassebedingte Besonderheiten in Bezug auf die Hornhärte. Pferde besitzen deutlich härteres Horn als Rinder, wobei das Wandhorn von Vollblutpferden eine größere Härte als das von Warm- und Kaltblutpferden aufweist (NAUMANN, 1984). KÖNIG und BUDRAS (2003) beschreiben auch Änderungen der Härte und Feuchtigkeit des Kronhornes in Abhängigkeit von dessen Alter. So kommt es zu einer Zunahme der Hornhärte vom inneren zum äußeren Kronhorn und gleichzeitig zu einer Abnahme des Wassergehaltes. Auch sind Unterschiede in proximodistaler Richtung zu verzeichnen. Die Hornhärte steigt vom Kronbereich bis zur Mitte des Zehenrückenteiles an, um auf Höhe der Hufbeinspitze wieder leicht abzufallen (KÖNIG u. BUDRAS, 2003).

Für die praktische Beurteilung der Hornqualität durch mechanisch-physikalische Prüfverfahren ist die Härtemessung von größter Bedeutung, da diese die physiologische Belastung der Hufkapsel bei der Fußung nachahmt (MÜLLING, 1993; NAUMANN et al., 1987; PELLMANN et al. 1993).

Die von verschiedenen Untersuchern ermittelten Werte des physiologischen Wassergehaltes und der Hornhärte sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst. Bei getrockneten Proben

## Literaturübersicht

aller Segmente ist die maximale Härte von 100 Shore-C-Einheiten (siehe Kapitel „Material und Methoden“) messbar (PATAN u. BUDRAS, 2003 b).

**Tabelle 1: Physiologischer Wassergehalt im Kronhorn des Pferdehufes  
(alphabetisch nach Autoren geordnet)**

Literaturquelle	Wassergehalt [%]	Bemerkungen
BERTRAM u. GOSLINE (1987)	17 - 24	keine Spezifizierung
BUTLER u. HINTZ (1977)	29,1 ± 0,2	Kronrand
	27,1 ± 0,2	Tragrand
DOUGLAS et al. (1996)	27,9 ± 1,7	äußeres Kronhorn
	35,5 ± 2,5	inneres Kronhorn
FROHNES (1999)	19,4	äußeres Kronhorn
HICKMAN (1983)	25	keine Spezifizierung
HINTERHOFER (1998)	22,7 ± 3,4	keine Spezifizierung
KÖNIG u. BUDRAS (2003)	23,5 ± 2,7	6 cm Abstand zum Kronrand
KÜNG (1991)	18	äußeres Kronhorn
	26	inneres Kronhorn
LEY et al. (1998)	31,16 - 33,83	keine Spezifizierung
MIYAKI et al. (1974)	27,1 ± 5,6	keine Spezifizierung
PATAN u. BUDRAS (2003 b)	18,74 ± 0,62	äußeres Kronhorn
	21,74 ± 0,56	mittleres Kronhorn
SPITZLEI (1996)	28 ± 2,8	keine Spezifizierung
STUMP (1967)	25	keine Spezifizierung



**Tabelle 2: Härtegrad [Shore] des ungetrockneten Kronhornes von Pferdehufen sowie von Rinder- und Schweineklauen (alphabetisch nach Autoren geordnet)**

Literaturquelle	Härtegrad [Shore]	Bemerkungen, Spezies u./o. Lokalisation	Messgerät
ALBARANO u. WARZECHA (1994)	78	Rind und Schwein	Shore-D
COENEN u. SPITZLEI (1996)	58,0 ± 2,3	keine Spezifizierung	Shore-D
FROHNES (1999)	77,1	äußeres Kronhorn	Shore-C
HINTERHOFER et al. (2001)	65,76 68,0	am Kronrand am Tragrand	Shore-D
KÖNIG u. BUDRAS (2003)	80,3 ± 3,4	6 cm Abstand zum Kronrand	Shore-C
PATAN u. BUDRAS (2003 b)	95,40 ± 3,06 87,93 ± 1,53	äußeres Kronhorn mittleres Kronhorn	Shore-C
SCHMITT (1998)	75 - 80	keine Spezifizierung	Shore-D
SCHNITKER (2004)	81,0 ± 3,54 79,42 ± 2,54	in Furche in Erhabenheit Przewalskipferd, mittleres Kronhorn	Shore-C
SPITZLEI (1996)	84 ± 1,4 57 ± 3,9	getrocknet, bei maximaler Feuchte	Shore-D

Die *Hufpflege* ist ein weiterer exogener Einfluss auf die Hufhornqualität. Sie hat die Erhaltung oder Wiederherstellung der Hufhornqualität zum Ziel und dient zudem der Reinigung und Feuchtigkeitszufuhr des Hufes. Ein Fetten der Hufwand verhindert einerseits das Verdunsten von Feuchtigkeit, andererseits wird das oberflächliche Eindringen von Wasser unmöglich gemacht (HERTSCH, 1999). Da an der Oberfläche der Hufwand die Gefahr des Austrocknens besteht und bei der konventionellen Stallhaltung domestizierter Pferde das Wasserregulationsvermögen nicht ausreichend genutzt werden kann, wie es bei Wildequiden der Fall ist (BUDRAS et al., 2002), kann diesem Problem nach ausreichender Wässerung durch eine geeignete Versiegelung entgegengewirkt und außerdem die Elastizität des Hornes gefördert werden (BUDRAS et al., 1998). Weil der Interzellularkitt auch Lipide enthält, hat ein Fetten der Hufwand neben den oben angeführten Vorteilen laut ANTHAUER (1996)

keine negativen Folgen. Von einem Fetten der Sohle und des Strahles raten BUDRAS und Mitarbeiter (1998) allerdings ab, weil das Horn dann für einen bakteriellen Abbau prädisponiert ist, da durch den Verschluss der Röhrenlumina mit Huffett anaerobe Bedingungen geschaffen werden und sich Pilze und Bakterien rasch vermehren. Aus diesem Grund raten auch EUSTACE (1994) und HICKMAN (1983) von der Verwendung von Hufölen, Cremes, Huffetten und Hufteer ab. Das Saumsegment, welches nur eine kurzfristige Wasserspeicherung zulässt, sollte regelmäßig befeuchtet und danach gefettet werden, um einer Austrocknung entgegenzuwirken. Solche Pflegemaßnahmen spielen im Ballen-Strahlsegment nur eine untergeordnete Rolle, da dieser Bereich eine hohe Wasserspeicherkapazität aufweist (PATAN u. BUDRAS, 2003 b).

Für die Erhaltung der Leistungsfähigkeit eines Pferdes spielen eine akkurate und regelmäßige Hufpflege sowie Hufkorrektur eine bedeutende Rolle (NAUMANN et al., 1987). Jegliche durch bakteriellen Abbau hervorgerufenen Verfärbungen sollten im Rahmen der Hufpflege entfernt und kraterähnliche Vertiefungen einer Behandlung mit Iodoformäther unterzogen werden (BUDRAS et al., 1998). Eine regelmäßige Hufkorrektur ist von besonderer Wichtigkeit, da bei domestizierten Pferden eine Selbstregulierung der Hornlänge im Gegensatz zu Wildpferden (SCHNITKER, 2004) nicht stattfindet (HERTSCH, 1999).

Ein geeignetes Trimmen der Hufe sollte den normalen Hornabrieb unterstützen und so bei optimaler Huflänge und -winkelung und geeigneter Bewegungsaktivität für eine optimale Lederhautdurchblutung sorgen (KÖNIG u. BUDRAS, 2003). Allerdings bleibt zu beachten, dass eine unregelmäßige Hufform auch durch einen unsachgemäßen Hufbeschlagn und eine inadäquate Hufzubereitung verursacht werden kann (FRIEDRICH, 1931). Ein mangelhafter Hufbeschlagn und schlechte Schmiedearbeit über einen längeren Zeitraum führen durch Fehlbelastungen der Hufkapsel letztendlich zu Hornspalten und ein falsches Setzen der Hufnägel (in die Hufwand statt in die weiße Linie) resultiert in Ausbrüchen im Bereich der Nagellöcher (EUSTACE, 1994). Das Ausschneiden und Beschlagen der Hufe beeinflusst nicht nur den äußeren Teil des Pferdefußes, sondern auch die vom Huf umgebenen inneren Strukturen, z. B. den Papillarkörper der Lederhaut. Ein Großteil aller Lahmheiten beim Pferd kann durch gute Schmiedearbeit verhindert werden. Somit nimmt kaum eine andere routinemäßige Arbeit am Sportpferd mehr Einfluss auf dessen Leistungsfähigkeit als die Bearbeitung der Hufe und der Hufbeschlagn (O`GRADY u. POUPARD, 2003).

## Literaturübersicht

Einfluss der *Ernährung* auf die Hornqualität:

Eine bedarfsgerechte Zufuhr an Mineralstoffen, Vitaminen und anderen Nährstoffen über die Nahrung ist ein nicht zu vernachlässigender und ausschlaggebender exogener Faktor mit Einfluss auf die Hornqualität (MÜLLING et al., 1999). Somit kann der Huf als Spiegel der Ernährung und der Gesundheit betrachtet werden (SCHNITKER, 2004).

Bei einer unzureichenden Versorgung mit *schwefelhaltigen Aminosäuren* kommt es zu einer Abnahme der Disulfidbrücken in den Keratinen der Hufhornzellen und folglich zu einer geringeren Widerstandsfähigkeit dieser gegenüber Umwelteinflüssen (CLARK u. RAKES, 1982). Die schwefelhaltigen Aminosäuren Cystein und Methionin spielen eine Rolle in der Ausbildung von Disulfidbrückenbindungen in den Keratinfibrillenbündeln und im marginalen Band (CLARK u. RAKES, 1982). Ferner verringert sich bei einem solchen Mangel die Hornbildungsrate (MEYER, 1995). Auch GROSENBAUGH und HOOD (1993) bringen die schwefelhaltigen Aminosäuren, Cystein und Methionin, mit der Hornqualität und der Hornbildungsrate in Zusammenhang. Allerdings kann eine Überversorgung mit Methionin zu einer fortschreitenden Degeneration des Hufhornes führen, da es in diesem Zusammenhang zu einer Blockierung der Absorption von Zink, Kupfer und Eisen und so zur Bildung von schwachem, parakeratotischem Horn kommt, was wiederum ein typisches Symptom des Zinkmangels darstellt (KEMPSON, 1996). SPITZLEI (1996) stellte bei intaktem Horn im Gegensatz zu Horn von mangelhafter Qualität eine lineare Beziehung zwischen der Hornhärte und dem Cysteingehalt fest. CLARK und RAKES (1982) schlagen in diesem Zusammenhang eine Supplementierung mit Schwefel vor, um die Hornbildungsraten des Hornes zu erhöhen und die Autoren beschreiben ferner den Einfluss von Methionin auf die Hornbildungsrate und Zusammensetzung des Klauenhornes bei Rindern. Die Hornbildungsrate von mit Methionin supplementierten Rindern ist demnach höher als bei Kontrolltieren. Diese Tiere zeigten geringere Cystein- und Prolingehalte im Horn als Kontrolltiere, aber höhere Gehalte an Methionin, Lysin, Tyrosin und Glutaminsäure. Diese Untersuchungsergebnisse lassen darauf schließen, dass die Aminosäurezusammensetzung des Hornes durch die Ernährung beeinflusst werden kann (CLARK u. RAKES, 1982). Laut COENEN und SPITZLEI (1996) ist der Anteil von Cystein und Methionin bei schlechter Hornqualität allerdings nicht verringert. Ein Mangel der schwefelhaltigen Aminosäure Cystein führt zu einer qualitativ minderwertigen Bildung der Keratine und des marginalen Bandes (cornified envelope) bis hin zu seinem vollständigen Verschwinden, was wiederum zu einer erhöhten Anfälligkeit der Hornzellen für proteolytische Enzyme führt (MÜLLING et al., 1999). Da das Hufhorn vornehmlich durch die

## Literaturübersicht

Keratinproteine aufgebaut wird, nimmt auch der Gesamteiweißgehalt des Futters Einfluss auf die Hornbildungsrate und Hornqualität (BUTLER u. HINTZ, 1977).

Die Versorgung der keratinisierenden und verhornenden Hufoberhaut mit *Mineralstoffen und Spurenelementen* ist ein weiterer entscheidender exogener Faktor für die Hornqualität (KEMPSON, 1987). Insbesondere *Kalzium* ist notwendig für die Aktivierung von Enzymen, die für die physiologische Keratinisierung und Verhornung von Bedeutung sind (MÜLLING et al., 1999). So spielt Kalzium eine Rolle in der Aktivierung der epidermalen Transglutaminase (DALE et al., 1993; GROSENBAUGH u. HOOD, 1993; RICE u. GREEN, 1979). Daneben spielt Kalzium eine Rolle in der Bildung des marginalen Bandes (RICE u. GREEN, 1979) und der intermediärfilament-assoziierten Proteine (DALE et al., 1993). KEMPSON (1987) konnte bei Pferden, die auf eine alleinige Behandlung mit Biotin (Vitamin H) nicht ansprachen, nach zusätzlichen Kalziumgaben eine Verbesserung der Hornqualität feststellen.

Weiterhin scheint bei Pferden mit defektem Horn der *Zinkstatus* verändert zu sein, da diese geringere Zinkgehalte im Hufhorn aufweisen (SPITZLEI, 1996). Zink ist der Cofaktor von über 200 Metalloenzymen, die ihre Funktion im Kohlenhydrat- und Eiweißstoffwechsel und in der Zellteilung haben, z. B. die Carboanhydrase, die Carboxypeptidase und die alkalische Phosphatase (ACKERMANN, 1987; LAMAND, 1984; ROSTAN et al., 2002). Zudem ist es Cofaktor des Enzyms Superoxid-Dismutase, das eine antioxidative Funktion hat. In diesem Zusammenhang beschreiben die Autoren zwei mögliche Wirkungsmechanismen dieser antioxidativen und photoprotektiven Wirkung auf die Epidermis. Zum einen sollen Zinkionen redoxaktive Moleküle wie Eisen und Kupfer an kritischen Stellen der Zellmembran ersetzen, zum anderen induzieren Zinkionen die Synthese von Metallothionin (ein sulfhydrylgruppenreiches Protein), das die Epidermis gegen freie Radikale schützt (ROSTAN et al., 2002). Zudem ist Zink Cofaktor von Enzymen, die im Fettsäuremetabolismus eine wichtige Rolle spielen. Hier ist Zink verantwortlich für die Umwandlung von Linolsäure zu Arachidonsäure, welche in die Zellmembran eingebaut wird. Arachidonsäure und ihre Metaboliten werden mit den Kontrollmechanismen in der Keratinozytenproliferation in Verbindung gebracht (MARSH et al., 2000). Des Weiteren ist Zink essentieller Bestandteil der Kollagensynthese in den Knochen (STARCHER et al., 1980) und in der Lederhaut (THOMPSON u. GILBREATH, 1976). Ein Zinkmangel ruft vielfach Haarausfall, Parakeratosen, Störungen der Keratinbildung, Verdickungen und Ulzerationen des Kronrandes und die Bildung von schwachem, brüchigem, deformiertem Hufhorn hervor, wobei es sich meist um einen

## Literaturübersicht

sekundären Zinkmangel, hervorgerufen durch andere Nahrungskomponenten, handelt. Ein primärer Zinkmangel wird durch eine Unterversorgung über das Futter verursacht, wohingegen ein sekundärer Zinkmangel häufig als Folge einer Kalziumübersorgung in Erscheinung tritt (LAMAND, 1984). Ein Zinkmangel oder eine Störung der Zinkverwertung führt zur Bildung von minderwertigem Horn (SPITZLEI, 1996), da Zink eine Rolle in der Ausbildung der Disulfidbrücken zwischen den Keratinfilamenten spielt (GAN u. STEINERT, 1993). Demnach ist in solchen Fällen eine erhöhte Zinkzufuhr angezeigt, da durch eine erhöhte Versorgung der Zinkgehalt im Hufhorn beeinflusst werden kann (SPITZLEI, 1996). DEMERTZIS und MILLS (1973) führten eine orale Zinktherapie bei Jungbullen mit infektiöser Pododermatitis durch und beobachteten eine schnelle und vollständige Heilung aller Klauenläsionen. Nach Meinung der Autoren fördert eine solche Zinksupplementation die Antikörperbildung und beschleunigt so indirekt die Heilung der Klauenläsionen.

Daneben fördert auch *Kupfer* die Ausbildung von Disulfidbrücken zwischen den Keratinpolypeptidketten (GAN u. STEINERT, 1993; DAVIS u. MERTZ, 1987).

Auch *Eisen* spielt eine wichtige Rolle im Bezug auf das Wachstum, die Aufrechterhaltung und Physiologie der Haut und ihrer Anhangsgebilde. So reagiert das Horn des menschlichen Nagels besonders sensibel auf einen Eisenmangel. Daneben reflektieren brüchige Fingernägel häufig einen Kalziummangel und insbesondere Imbalancen des Eisen-Kalzium-Verhältnisses (LANSDOWN, 2001).

*Selen*, welches ein Bestandteil des Enzyms Glutathionperoxidase ist, sorgt zusammen mit Vitamin E für die Entgiftung der beim Abbau ungesättigter Fettsäuren entstehenden Peroxide und verhindert so eine Schädigung der Zellmembran der keratinisierenden und verhornenden Zellen (MEYER, 1995).

Allerdings kann ein Überschuss dieser Mineralstoffe auch negative Effekte auf die Hornqualität mit sich bringen. In gleicher Weise ist auch nicht die absolute *Kalziumkonzentration* im Futter wichtig, sondern das Verhältnis von Kalzium und *Phosphor*. Ein zu hoher Phosphorgehalt verringert die Kalziumaufnahme aus dem Darm und ruft so einen Kalziummangel hervor (KEMPSON, 1996). Auch eine Übersorgung mit *Selen* kann zur Störung der Keratinsynthese führen. Folgen sind ödematöse Schwellungen am Saumrand des Hufes, horizontale Ringe und Spalten im Horn bis hin zum Ausschuhlen (MEYER, 1995). Als Folgen einer chronischen Selenintoxikation beschreibt BEASLEY (1999) Lahmheiten, Haarausfall an Schweif und Mähne, Hufhorndeformationen, horizontale und ringförmige Risse und Hornspalten im Hufhorn unterhalb des Kronrandes. Mikroskopisch zeigen sich kristalline Selenablagerungen im Horn, wobei die Zellen eine geschrumpfte Form aufweisen

## Literaturübersicht

(KEMPSON, 1996). Die Versorgung mit den Spurenelementen Selen und Kupfer hat nach SPITZLEI (1996) allerdings keinen Einfluss auf die Hornqualität.

Auch bei extrem überhöhter *Zink*aufnahme zeigen sich Risse im Horn und über dem Saum des Hufes (MEYER, 1995).

LEY und Mitarbeiter (1998) beobachten einen positiven Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit des Hornes und dem *Schwefelgehalt* im Hufhorn. Der Schwefelgehalt variiert stark in den verschiedenen Segmenten des Pferdehufes und gesundes Hufhorn weist einen deutlich höheren Schwefelgehalt auf als erkranktes Horn (BERGER u. BRÜGGEMANN, 1938).

Für *Kobalt* besteht kein direkter Zusammenhang zwischen den Gehalten in Horn, Haar und Blut einerseits und der Nährstoffversorgung andererseits (COENEN u. SPITZLEI, 1997).

HINTZ (1993) beschreibt die *Interaktionen* zwischen den verschiedenen Mineralstoffen und Spurenelementen. Demnach führt der Überschuss eines Mineralstoffes zu einem Mangel eines anderen Elementes. Die übermäßige Aufnahme von Phosphor kann neben einer gestörten Kalziumaufnahme auch zu einer Verringerung der Magnesium- und Kaliumabsorption führen (HINTZ u. SCHRYVER, 1976; HINTZ u. SCHRYVER, 1992). Parakeratosen durch Zinkmangel werden oft durch eine erhöhte Aufnahme von Kalzium hervorgerufen. Auch behindern übermäßige Kalziumaufnahmen die Verwertung von Magnesium, Eisen, Schwefel. Ein weiterer wechselseitiger Antagonismus besteht zwischen Kupfer und Zink (OESTREICHER u. COUSINS, 1985) sowie zwischen Kupfer und Eisen (VALBERG u. FLANGAN, 1984). Ferner übt Kupfer einen antagonistischen Einfluss auf den Selenhaushalt aus (STOWE, 1980). Aus diesen Gründen muss eine Mangel eines Mineralstoffes oder Spurenelementes mit Vorsicht behandelt werden (HINTZ 1993). ROSTAN und Mitarbeiter (2002) empfehlen deshalb, Kalzium- und Zinksupplemente zu verschiedenen Tageszeiten zu verabreichen. WICHERT und Mitarbeiter (2002) weisen darauf hin, dass die Gehalte an Zink, Kupfer und Selen in Blut, Haar und Horn nicht in direktem Zusammenhang zur jeweiligen Aufnahme über das Futter stehen. So besteht keine direkte Abhängigkeit des Zink-, Kupfer- und Selenplasmaspiegels von der jeweiligen Versorgung. Auch die Zink-, Kupfer- und Selengehalte im Wandhorn weisen keine direkte Abhängigkeit von der Versorgung auf. Ebenso stellen Selengehalte im Hufhorn und Deckhaar keinen zuverlässigen Indikator für die Selenversorgung dar, da selbst bei scheinbar deutlich unterversorgten Pferden häufig jegliche Selenmangelercheinungen fehlen (WICHERT et al., 2002).

## Literaturübersicht

*Vitamine*, insbesondere Biotin (Vitamin H, Gruppe der B-Vitamine), sind essentiell für den Metabolismus der Epidermiszellen (MÜLLING et al., 1999). So wirkt sich *Biotin* vor allem als Coenzym von Carboxylierungsreaktionen (BUFFA et al., 1992; LÖFFLER, 1988; STRYER, 1988; ZENKER, 1991), wie sie in der Glukoneogenese, in der Lipogenese und im Aminosäurestoffwechsel vorkommen (BUFFA et al., 1992; STRYER, 1988), positiv auf die Hornqualität des Hufes aus. Nach FRITSCHÉ und Mitarbeitern (1991) hat Biotin in vitro eine differenzierungsinduzierende Wirkung auf epidermale Zellen. In physiologischen Konzentrationen übt dieses Vitamin die klassische Coenzymfunktion aus, während es in pharmakologischen Konzentrationen die Differenzierung von Epidermiszellen in vitro anregt (FRITSCHÉ et al., 1991). Biotin wird auch im Organismus selbst synthetisiert und zwar im Intestinaltrakt (Caecum und Colon). Jedoch ist die resorbierte Menge des von Bakterien synthetisierten Biotins vernachlässigbar gering (BUFFA et al., 1992). Die ersten Anzeichen eines chronischen Biotinmangels äußern sich meist in Veränderungen der Haut und ihrer Anhangsgebilde (COMBEN et al., 1984). Langzeitgaben von Biotin haben einen positiven Effekt auf die Hornqualität und führen in vielen Fällen zu einer deutlichen Verbesserung des Hufstatus (BUFFA et al., 1992; CAMPBELL et al., 2000; COMBEN et al., 1984; FITZGERALD et al., 2000; FRITSCHÉ et al., 1991; GEYER u. SCHULZE, 1994; HEDGES et al., 2001; HOCHSTETTER, 1998; JOSSECK et al., 1995; KEMPSON, 1987; LEU, 1987; SCHMITT, 1998; WINTZER, 1986; ZENKER et al., 1995). Dabei darf der positive Einfluss des Biotins frühestens nach fünf Monaten kontinuierlicher Supplementierung erwartet werden und eine solche Zufütterung muss über einen Zeitraum von mindestens sechs bis neun Monaten stattfinden (COMBEN et al., 1984). Das Klauenhorn biotindefizienter Schweine ist weich, brüchig oder gar nekrotisch. Eine Biotinzufuhr verbessert die Klauen- und Hufhornqualität von Kühen, Schweinen und Pferden selbst ohne apparenten Biotinmangel (FRITSCHÉ et al. 1991; LEU, 1987). Ferner erhöht sich die Hornhärte des Kronhornes unter Biotinsupplementierung, während die Härte im Ballensegment abnimmt (WEBB et al., 1984). Eine Biotinsupplementierung führt auch zu einer strukturellen Verbesserung der zellulären, intra-, sowie interzellulären Strukturen (HEDGES et al., 2001; HOCHSTETTER, 1998). Laut WINTZER (1986) wird die Hornbildungsrate unter Biotinsupplementierung nicht beschleunigt, da Biotin keinen Einfluss auf die Anzahl der Epidermiszellen nimmt. Allerdings zeigt das Vitamin Einflüsse auf die Keratinisierung und damit auf die Qualität der Epidermiszellen. REILLY und Mitarbeiter (1998 b) konnten im Gegensatz zu WINTZER (1986) im Zuge einer Biotinsupplementierung eine Steigerung der Hornbildungsrate um bis zu 15 % feststellen. FRITSCHÉ und Mitarbeiter (1991) untersuchten die Wirkung von Biotin

auf die Expression der Zytokeratine. In bestimmten Konzentrationen bewirkt Biotin eine Zunahme der Zytokeratine, die bei der terminalen Differenzierung von Epidermiszellen *in vivo* vermehrt gebildet werden. Die Menge der Zytokeratine, die in allen mehrschichtigen Epithelien unabhängig vom Differenzierungsstatus vorkommen, verändert sich dagegen nicht (FRITSCHKE et al., 1991). Demnach werden bei einem Biotinmangel Keratinfilamente im Stratum spinosum vermindert gebildet (MÜLLING et al., 1999). Des Weiteren hat Biotin einen Einfluss auf den Energie- und Fettstoffwechsel der Epidermiszellen und führt neben der Veränderung des Zytokeratinmusters auch zu einer Veränderung des Interzellularkittes (HOCHSTETTER, 1998).

Auch *Vitamin A* hat eine wichtige Wirkung auf die Integrität des Hornes, da es Einfluss auf die epidermale Transglutaminase nimmt, ein Enzym, welches die Proteine des marginalen Bandes mit der Zellmembran verbindet (GRIFFITH et al., 1992). Im Falle eines Vitamin A- oder Karotinmangels neigt Horn zu Spaltenbildung und Brüchigkeit (GRIFFITH et al., 1992; MEYER, 1995).

*Nikotinsäure* (Gruppe der B-Vitamine) steigert die Ceramidbiosynthese, die Synthese der Glucosylceramide und Sphingomyeline, die Synthese von Cholesterol und freien Fettsäuren im Stratum corneum und senkt so den transepidermalen Feuchtigkeitsverlust trockener Haut und anderer keratinisierter Gebilde (TANNO et al., 2000).

Die bedeutendste Rolle von *Vitamin E* ist die eines fettlöslichen Antioxidans. Durch diese Funktion spielt Vitamin E eine wichtige Rolle in der Aufrechterhaltung des Lipidanteils von Zellmembranen. Dieses ist auch im Bezug auf keratinisierte Gewebe wichtig, da der Interzellularkitt eine lipidreiche Substanz darstellt (MÜLLING et al., 1999).

Das *Vitamin D* ist einer der wichtigsten Kalziumregulatoren im Organismus. Ein Mangel an Vitamin D führt unweigerlich zu Störungen des Kalziummetabolismus und somit zu einer Störung der Keratinisierung (TOMLINSON et al., 2004), da einige der für die Keratinisierung und Verhornung wichtigen Enzyme abhängig von der lokalen Kalziumkonzentration sind.

*Essentielle, ungesättigte Fettsäuren* spielen eine wesentliche Rolle in der Synthese des Interzellularkittes und somit auch im Aufbau der Permeabilitätsbarriere des Stratum corneum (MÜLLING et al., 1999). So führt eine mangelhafte Versorgung mit Linolsäure zu einer Störung der Barrierefunktion im Interzellularkitt (ELIAS, 1981) und zur Ausbildung von schuppiger Haut (WERTZ u. DOWNING, 1982). Ferner beobachteten MARSH et al. (2000) eine deutliche Verbesserung von Haut und Haarkleid bei einer Zufütterung von Linolsäure und Zink. Auch eine Supplementierung mit Leinsamen- und Sonnenblumenöl, die reich an



ungesättigten Fettsäuren sind, führt zu einer Besserung von Haut und Haarkleid, wobei diese Änderungen mit erhöhten Serumwerten von mehrfach ungesättigten Fettsäuren einhergehen (REES et al., 2001). Die Linolsäure ist wesentlicher Bestandteil der Phospholipide und Ceramide im Stratum corneum der Epidermis und ist notwendig für die Aufrechterhaltung ihrer Permeabilitätsbarriere (ELIAS et al., 1980; WERTZ u. DOWNING, 1982). REILLY und Mitarbeiter (1998 c) konnten nach einer Supplementierung mit Nachtkerzenöl, welches reich an essentiellen Fettsäuren ist, keine signifikante Erhöhung der Hornbildungsrate feststellen. Allerdings erhöhte sich die Lipidfraktion des Saumhornes und der Gehalt an freiem Cholesterin verringerte sich. Untersuchungen von OFFER und LOGUE (1998) zeigen, dass sich das Fettsäureprofil in den Klauen lahrender Rinder deutlich von jenem gesunder Klauen unterscheidet. So kann solchen Lahmheiten durch eine Verbesserung der Klauenlipidzusammensetzung über die Fütterung maßgeblich entgegengewirkt werden (OFFER et al. 2000).

### **3. Zusammensetzung des Hufhornes**

Kalzium, Phosphor und Natrium sind die *Hauptmineralstoffe* des Hornes von Huf und Klaue (KOVÁCS u. SZILÁGYI, 1973 a). Die Haut und ihre Anhangsgebilde sind aber auch zinkreiche Gewebe und enthalten etwa 20 % des Gesamtzinkgehaltes des Körpers (HENZEL et al., 1970). Nach NAUMANN und Mitarbeitern (1987) ist der Schwefelgehalt im Hufhorn junger Pferde höher als bei älteren Tieren, in Bezug auf den Eisen- und Kupfergehalt verhält es sich umgekehrt. Auch hinsichtlich des Wasseraufnahmevermögens zeigen sich unterschiedliche Muster in der Mineralstoffverteilung. Ist dieses Aufnahmevermögen niedrig, ist auch der Kupfergehalt des Hufhornes gering. Natrium-, Mangan-, und Zinkgehalt steigen mit zunehmendem Wasseraufnahmevermögen an, während bei einem mittleren Wasseraufnahmevermögen die niedrigsten Kaliumwerte zu verzeichnen sind. Zudem steht die Zugfestigkeit des Hufhornes in positivem Zusammenhang mit dem Schwefelgehalt (LEY et al., 1998).

Saisonale Einflüsse sowie die Fütterung des Tieres haben großen Einfluss auf die Mineralstoffzusammensetzung des Hornes (LEY et al., 1998). Untersuchungen von BAGGOTT und Mitarbeitern (1988) ergaben, dass der Wassergehalt zusammen mit der Magnesiumkonzentration des Hornes mit zunehmendem Alter der Tiere ansteigt. Auch die Hornhärte ist abhängig von der Zusammensetzung des Hornes. So enthält das härtere Wandhorn mehr Kalzium, Kupfer, Zink und Phosphor, einen geringeren Wassergehalt und geringere Werte an Natrium, Kalium und Eisen als das weich-elastische Horn des

## Literaturübersicht

Ballensegmentes. Der Zinkgehalt ist im Wandhorn deutlich höher als in allen anderen Hufsegmenten (WEISER et al., 1965). Bei lahmen Tieren ist die Zinkkonzentration geringer als bei Tieren mit intaktem Horn, wobei gleichzeitig der Gehalt an Magnesium und Kupfer erhöht ist (BAGGOTT et al., 1988). BODUROV und Mitarbeiter (1981) sehen hingegen keine Unterschiede im Kalzium-, Magnesium-, Kupfer- und Zinkgehalt zwischen intaktem und krankhaft verändertem Horn. Dagegen weist gesundes Horn höhere Werte an anorganischem Schwefel (BODUROV et al., 1981), Kalium und Phosphor als krankhaft verändertes Horn auf (NAUMANN et al., 1987). Einen Einfluss von Geschlecht, Alter und Farbe der Pferde sowie der Hufpigmentierung auf die Verteilung von Natrium, Kalium, Kalzium, Phosphor, Magnesium, Kupfer und Zink im Hufhorn können WEISER und Mitarbeiter (1965) sowie SCHMIDT (1984) nicht feststellen. Allerdings ist der Selen- und Zinkgehalt des Hornes rasse- und segmentabhängig (KOVÁCS u. SZILÁGYI, 1973 a). Kaltblüter weisen den höchsten und Vollblüter den niedrigsten Zinkgehalt auf, während bei Selen das Gegenteil der Fall ist (COENEN u. SPITZLEI, 1996; COENEN u. SPITZLEI, 1997, NAUMANN et al., 1987). Weiterhin besitzt das Hufhorn von Kaltblutpferden höhere Kalziumwerte als das von Vollblutpferden, wobei letztere auch niedrigere Magnesiumgehalte im Hufhorn aufweisen als andere Pferderassen. Auch sollen Hufe von mittlerem Pigmentgehalt höhere Magnesiumkonzentrationen besitzen als unpigmentierte Hufe (NAUMANN et al., 1987). Einen Überblick des Mineralstoff- und Spurenelementgehaltes im Hufhorn gibt Tabelle 3.

**Tabelle 3: Mineralstoff- und Spurenelementgehalt im Wand- und Sohlenhorn von Pferdehufen (NAUMANN et al., 1987)**

Mineralstoff/Spurenelement	Wandhorn Konzentration [mmol/kg Trockenmasse]	Sohlenhorn Konzentration [mmol/kg Trockenmasse]
Schwefel	570 ± 155	480 ± 156
Natrium	37 ± 9	44 ± 10
Kalium	32 ± 14	56 ± 23
Kalzium	11 ± 8,9	12 ± 12
Magnesium	2,8 ± 1,5	2,8 ± 1,5
Phosphor	keine Angabe	6,9 ± 2,7
Chlor	105 ± 20	114 ± 24
Eisen	2,1 ± 3,6	1,05 ± 0,84
Kupfer	0,037 ± 0,015	0,032 ± 0,010
Mangan	0,031 ± 0,042	0,018 ± 0,010
Zink	2,32 ± 0,58	1,56 ± 0,55

*Lipide* sind Bestandteil der Zellmembran der Hornzellen und der Interzellulärsubstanz der Hufepidermis. Die Lipidfraktion der toten, epidermalen Hornschicht setzt sich aus Neutralfetten, Triacylglycerol, Cholesterol, Ceramiden und polaren Lipiden zusammen (SCAIFE et al., 2000). Das Horn von Rinderklauen und Pferdehufen weist hierbei eine ähnliche Zusammensetzung auf, wobei dieses wiederum ein ähnliches Muster wie in der Epidermis der behaarten Haut zeigt (SCAIFE et al., 2000). Ceramide sind ein Hauptbestandteil des Stratum corneum und machen hier etwa 30 – 40 % aller Lipide aus (HAMANAKA et al., 2002). Zusammen mit Cholesterol und Fettsäuren bilden diese die epidermale Permeabilitätsbarriere (HAMANAKA et al., 2002; SCAIFE et al., 2000; VIELHABER et al., 2001). Lebende Epidermiszellen enthalten hingegen zusätzlich Phospholipide und Glucosylceramide (GRAY u. YARDLEY, 1975). WERTZ und DOWNING (1984) beschreiben die Lipidzusammensetzung des Hufhorns bei Pferden. So enthält das Horn Cholesterol (37 – 40 %), sechs Gruppen von Ceramiden (10 – 15 %) und Cholesterylsulfat (15 – 20 %). Freie Fettsäuren sind in der äußeren keratinisierten Hornschicht nicht vorhanden, sondern tauchen nur in geringen Mengen im Hyponychium sive Wandhorn (3,1 %) auf. Kühe, welche eine Lahmheit zeigen, besitzen eine signifikant höhere

Konzentration an Linolsäure (C 18:2), Linolensäure (C 18:3), Eicosatriensäure (C 20:3) und Arachidonsäure (C 20:4) im Klauenhorn, aber niedrigere Konzentrationen an Palmitinsäure (C 16:0), Palmitoleinsäure (C 16:1), Ölsäure (C 18:1) und Arachinsäure (C 20:0) (OFFER u. LOGUE, 1998).

Fettsäure	Sohle	Ballen	Wand
C 16:0	21,4	26,5	26,6
C 16:1	6,3	4,1	1,5
C 18:0	8,3	11,0	13,4
C 18:1	10,8	10,0	9,7
C 18:2	11,9	8,2	5,9
C 18:3	3,3	2,7	1,3
C 20-24	13,9	11,9	8,3
> C 24	8,5	7,5	2,6

**Tabelle 4:**

**Fettsäurezusammensetzung der Fettsäuremethylester (FAME) in Rinderklauen, [g/kg Trockenmasse] (SCAIFE et al., 2000); C = Kohlenstoffatome in der Fettsäurekette, z. B.: 18:2 = 18 Kohlenstoffatome und zwei Doppelbindungen in der Fettsäurekette**

Außer den Fettsäuren hat auch die Aminosäurezusammensetzung der verschiedenen Proteine im Hufhorn einen wesentlichen Einfluss auf die Hornqualität. Krankhaft verändertes Horn zeigt einerseits geringere Gehalte an den *Aminosäuren* Lysin, Arginin, Asparagin, Tyrosin, Serin, Prolin, Cystein, Methionin und Phenylalanin als gesundes Klauenhorn, andererseits aber höhere Gehalte an Glutamin, Glycin, Valin und Leucin (BODUROV et al., 1982).

#### **4. Die Bedeutung des Hufes für die Einsatzfähigkeit des Pferdes**

Die Hornbildungsrate und Hornqualität des Pferdehufes sind von ausschlaggebender Bedeutung, da diese maßgeblich die Nutzbarkeit eines jeden Pferdes bestimmen (BUTLER u. HINTZ, 1977). Das Zehenendorgan des Pferdes erfüllt eine Reihe wichtiger Funktionen. Zum einen dient der Huf als Schutzeinrichtung und Stoßbrecher für die Gliedmaße (PATAN u. BUDRAS, 2003 b; DOUGLAS, 1997; HABERMEHL, 1996; HICKMAN, 1983; KASAPI u. GOSLINE, 1998), zum anderen dient dieser als Scharr- und Tastorgan und wird aufgrund seiner enormen Härte auch als Waffe eingesetzt (HABERMEHL, 1996). Bei Wildpferden spielen intakte Hufe eine überlebenswichtige Rolle, da ein lahmes Pferd seiner wichtigsten Feindabwehr, der schnellen Flucht, beraubt ist und somit leicht Feinden zum Opfer fällt (KNEZEVIC, 1959). Der Pferdehuf ermöglicht ein federndes, elastisches Stoßabfangen und die modifizierte Lederhaut sorgt mit ihren Zöttchen und Blättchen für eine

## Literaturübersicht

festen Verbindung zwischen Corium und Epidermis (HABERMEHL, 1996). Voraussetzung für einen funktionierenden Hufmechanismus ist qualitativ gutes Horn und eine intakte Hufkapsel (REILLY, 1995). In der stark verhornten Hufkapsel ist das Pferd mit seinem Hufbein durch die interdigitierenden Lederhaut- und Oberhautblättchen aufgehängt, was bedingt, dass der einzelne Huf beim Aufsetzen die gesamte Körperlast tragen muss. Im Galopp kann diese Belastung das Mehrfache des eigenen Körpergewichtes betragen (NICKEL, 1938). Allein im Stand muss jedes Vorderbein mehr als ein Viertel des gesamten Körpergewichtes tragen (HICKMAN, 1983). Der Huf ist sicherlich einer der am stärksten belasteten Teile des Pferdekörpers und ist deshalb besonders überlastungsgefährdet (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Durch den Hufbeinträger (eine Vorrichtung, durch die das Hufbein in der Hufkapsel aufgehängt ist) wird die Druckkraft des Körpergewichtes, die auf das Hufbein wirkt, in eine Zugkraft verwandelt, um dann in der Hufplatte zurück in eine Druckkraft gewandelt zu werden. Durch diesen Hufmechanismus wird ein federnd-elastisches Aufsetzen sichergestellt. Demzufolge variieren die Horneigenschaften in den einzelnen Segmenten des Hufes (PATAN u. BUDRAS, 2003 b), was von wesentlicher Bedeutung für dessen Biomechanik ist (PELLMANN et al., 1993). Die Teile des Hufes, welche beim Setzen den Boden berühren und somit das Gewicht tragen, sind der Tragrand, die Eckstreben, die weiße Linie, der Strahl und ein schmaler Streifen der Sohle am inneren Rand der weißen Linie (STUMP, 1967). Die Hornröhrchen aller drei Kronhornzonen verfügen über die Funktion eines Stoßdämpfers und nehmen beim Setzen und nach dem Sprung schräg vertikal einwirkende Druckkräfte auf. Das äußere Kronhorn ist auch zur Aufnahme und Verteilung horizontaler Druckkräfte geeignet und fungiert auf Grund seiner enormen Härte als eigentliche Schutzschicht der Hufplatte (NICKEL, 1938), während das innere Kronhorn primär als eine elastische, abfedernde Verankerungsschicht für den Hufbeinträger dient (PELLMANN, 1995). Das mittlere Kronhorn nimmt sowohl in struktureller als auch in funktioneller Hinsicht eine Mittelstellung ein und sichert somit die Aufnahme und Verteilung von Zug- und Druckkräften verschiedener Richtungen (KÖNIG u. BUDRAS, 2003).

Ebenso spielt die Hufform im Bezug auf die Nutzbarkeit und Leistungsfähigkeit des Pferdes eine nicht zu unterschätzende Rolle. KANE und Mitarbeiter (1998) untersuchten Huffgröße und Hufform als mögliche Risikofaktoren für schwerwiegende muskuloskeletale Verletzungen bei Galopprennpferden. Demnach soll eine Verringerung der Differenz zwischen Vorderwand- und Trachtenwinkel zu einer Reduktion von Erkrankungen des Fesselträgers führen. Pferde, deren Hufe einen geringen Vorderwandwinkel aufweisen, leiden nach Ansicht der Autoren weitaus häufiger an muskuloskeletalen Verletzungen der

## Literaturübersicht

Gliedmaßen als solche mit einem größeren Vorderwandwinkel. Nach einer Studie von SLATER und HOOD (1997) weisen etwa 80 % aller von ihnen untersuchten Pferde gravierende Hufprobleme auf. Hufhorn von guter Qualität und ausreichender Widerstandsfähigkeit wirkt sich erhaltend und fördernd auf die gesamte Gliedmaßengesundheit eines jeden Pferdes aus (NAUMANN et al., 1987) und jegliche Veränderungen der funktionellen Integrität der Hufkapsel können zu Lahmheiten und schließlich finanziellen Verlusten für den Besitzer führen (KEMPSON u. CAMPBELL, 1998). Schlechte Hornqualität äußert sich unter anderem in weichem, schuppigem Hufhorn, welches dazu neigt, Hornspalten und Tragrandausbrüche auszubilden, was zu einem regelmäßigen Hufeisenverlust führen kann. Dieses führt wiederum häufig zu Lahmheiten und so zu einer eingeschränkten Nutzung des betroffenen Tieres (BUFFA et al., 1992; WINTZER, 1986). Auch schützt die Hufkapsel die Knochen, Gelenke und weichen Gewebe innerhalb der Hufkapsel vor schädlichen chemischen und physischen Einflüssen aus der Umwelt (KEMPSON u. CAMPBELL, 1998).

Zudem ist auch der Wassergehalt des Hufhornes von großer Bedeutung für die Leistungsfähigkeit eines Pferdes. Bei einem ausgeglichenen Wassergehalt verlaufen Spalten und Risse im Interzellularraum parallel zum Tragrand und schonen somit das lebende Gewebe (BERTRAM u. GOSLINE, 1986). Diese Art von Schutzmechanismus versagt bei einem übermäßig hohen bzw. niedrigen Wassergehalt des Hufhornes und so verlaufen Risse bei gleicher Belastung dann parallel zur Röhrchenlängsachse in Richtung Tragrand (BERTRAM u. GOSLINE, 1987). KASAPI und GOSLINE (1998) bestätigen diese wichtige „Bruchablenkung“ für die Nutzbarkeit eines jeden Pferdes, denn eine bis in die vaskularisierte Lederhaut dringende Hornspalte führt unabwendbar zu hochgradigen, langwierigen Lahmheiten.

### **5. Die Hufform**

STASHAK (1989) bezeichnet einen Pferdehuf als regelmäßig, wenn beide Seiten der Bodenfläche seines Tragrandes gleichzeitig und plan beim Fußen aufgesetzt werden und wenn der Huf in der Stützbeinphase so gestellt ist, dass dieser gleichmäßig belastet wird. Ein regelmäßiger Vorderhuf ist rund, mit einem breiten Trachtenteil und kräftigen Eckstreben. Die Wand hat an der Zehe die größte Stärke und verjüngt sich in Richtung der Trachten.

Der regelmäßige Hinterhuf ist stumpfer gewinkelt und besitzt eine längsovale Sohlenfläche (KÖRBER, 1989; STASHAK, 1989). Die in der Literatur angegebenen Messwerte für einen regelmäßigen Pferdehuf, vor allem für den Vorderwandwinkel (auch Zehenrückenwinkel genannt), gehen zum Teil weit auseinander und sind zum Zwecke einer besseren Übersicht in Tabelle 5 aufgeführt. Der Unterschied zwischen den Vorderwandwinkeln von Vorder- und Hinterhufen liegt bei  $1^\circ$  bis  $3^\circ$ , wobei dieser Winkel aber häufig auch identisch ist (SCHROTH, 2001). Das Verhältnis von Zehenrückenlänge des Hufes zur Länge seiner Trachtenwand gibt KÖRBER (1989) beim Vorderhuf mit 3:1 und beim Hinterhuf mit 2:1 an. VOGT (1938) verzeichnet ein Verhältnis von 2,5:1 am Vorderhuf und 3:1 am Hinterhuf. Bei Shetlandponys beträgt dieses Verhältnis vorne 1,54:1 und hinten 1,78:1 (HERZBERG, 1996). FRIEDRICH (1931) unterscheidet nicht zwischen Vorder- und Hinterhufen und gibt das Verhältnis der Längen von Zehenrücken- zu Trachtenwand mit 2:1 an.

THOMASON und Mitarbeiter (2001) setzen die Struktur des Blättchenapparates im Pferdehuf mit der Hufkapselform in Relation und beschreiben einen Unterschied zwischen Hufen mit normalem dorsalem Zehenwinkel und spitz gewinkelten Hufen. Unterschiede in der Hufform führen zu einer Umverteilung der Kräfte innerhalb des Hufes, welche sich insbesondere auf die Struktur des Blättchenapparates auswirken. Bei spitz gewinkelten Hufen kommt es zu einer Vergrößerung des Abstandes zwischen den Blättchen und somit zu einer stärkeren Belastung dieser interdigitierenden Epidermis- und Lederhautblättchen. Ferner werden bei Überbelastung die Blättchen breiter. Zudem bedingen solche Hufe eine Überlastung der Beugesehnen, der Hufrolle und des Hufbeinträgers und führen infolgedessen zu krankhaften Veränderungen dieser Strukturen (STASHAK, 1989; THOMASON et al., 2001). Spitze Vorderwandwinkel treten meist bei unbeschlagenen, vernachlässigten Pferdshufen auf, insbesondere wenn die Tiere auf weichem Untergrund gehalten werden. Solche Hufe sind das Resultat einer regionalen Imbalance zwischen Hornproduktion und Hornabrieb. Durch eine hohe Hornproduktionsrate im Zehenbereich und eine geringe Produktion im Trachtenbereich kommt es zu einer Abflachung des Hufes und somit zu einer Verkleinerung des Zehenrückenwinkels (STASHAK, 1989). Angaben zu physiologischen Hufwinkeln sind

allerdings nicht ohne weiteres auf jedes Pferd anwendbar, da sich die ideale Hufwinkelung aus der jeweiligen Zehenachse ergibt.

Die Hufform ist von großer Bedeutung im Bezug auf die biomechanischen Funktionen des Hufes und jegliche vorgenommene Änderung am distalen Teil des Hufes beeinflusst dessen Winkelung (O'GRADY u. POUPARD, 2003). Bei einem Trachtenzwang folgt die Wachstumsrichtung der Trachten der der Zehe. Je länger die Zehe wird, desto länger und flacher wird auch der Trachtenbereich und die Zehenachse wird gebrochen. Je flacher die Trachten dann werden, desto schneller ist der Punkt erreicht, an dem die Hornröhrchen der Trachten umgebogen werden, bis sie parallel zum Untergrund verlaufen. Dann ist der Trachtenbereich der Hufplatte unfähig, das Gewicht des Pferdes zu tragen, die Hornwand wird dünn und die Trachten kollabieren. Es folgt eine höhere Belastung des Strahls und eine Abflachung der Sohle.

Ein Bockhuf mit einem großen Vorderwandwinkel führt häufig zur Ausbildung einer dünnen Sohle, zu Hornspalten und zu Veränderungen der weißen Linie. Ursachen einer solchen fehlerhaften Form des Hufes können eine falsche Hufzubereitung mit einem zu starken Trimmen der Zehe oder chronische Hufrehe sein (O'GRADY u. POUPARD, 2003). Es existieren deutliche Unterschiede der Spannungsverhältnisse zwischen spitz gewinkelten, langen Hufen und stumpf gewinkelten, kurzen Hufen. Bei einem langen Huf erhöht sich die Spannung im distalen Bereich, während die Spannung im Bereich des Kronrandes sinkt. Im Falle einer gebrochenen Zehenachse wird das Körpergewicht in unnatürlicher Weise getragen, was in einer Über- bzw. Entlastung verschiedener Hufsegmente resultiert und so über eine Beeinflussung der Hornbildung zu einer Umbildung der Hufform führt (MC CLINCHEY et al., 2003).

Die Entwicklung bestimmter Hufformen hängt auch maßgeblich von der Aktivität des Tieres, der Vererbung, der individuellen Gliedmaßen- und Hufstellung, der Rasse und der Aufzucht ab (GRÖTZ, 1922; STASHAK, 1989). So zeigen die Hufe eines neugeborenen Fohlens keinerlei Asymmetrien (GRÖTZ, 1921). Daneben existieren deutliche Unterschiede der Hufform zwischen verschiedenen Pferderassen, wobei Wildpferde steilere Zehenrückwinkel ihrer Hufe aufweisen als domestizierte Pferde (LEU, 1987). Auch bezüglich der Längenparameter des Hufes gibt es rassespezifische Unterschiede (FISCHER, 1933). Zudem weisen auch „normale“ Hufe so gravierende individuelle Unterschiede und Differenzen bezüglich des Alters, der Rasse und der Nutzung auf, dass sich keine genauen generellen Angaben hinsichtlich der Huflänge machen lassen (FISCHER, 1933).



## Literaturübersicht

Die Trachtenlänge (Strecke zwischen Kron- und Tragrand an der Trachte) gibt MEIER (1917) am Vorderhuf mit 3,1 cm, am Hinterhuf mit 3,3 cm und VOGT (1938) am Vorderhuf mit 4 cm an. Bei den Pferderassen Belgier und Shire besitzen die Hufe eine durchschnittliche Trachtenlänge von 75 mm, bei Hannoveranern von 55 mm und bei Isländern von 50 mm (LEU, 1987). HERZBERG (1996) ermittelt bei Shetlandponys eine Trachtenlänge von 3,7 cm für den Vorderhuf und 3,2 cm für den Hinterhuf.

Auch bezüglich der Sohlenweite (Hufdurchmesser am Tragrand, „weiteste Stelle“, Hufbreite) sind starke rassespezifische Unterschiede vorhanden. So beträgt die Sohlenweite beim Belgier, Shire, Hannoveraner und Isländer am Vorderhuf 170mm, 192 mm, 142 mm bzw. 116 mm und am Hinterhuf 159 mm, 170 mm, 120 mm bzw. 106 mm (LEU, 1987). UM und Mitarbeiter (1997) geben für Rennpferde am Vorderhuf eine Hufbreite von  $130,9 \pm 0,30$  mm und für den Hinterhuf von  $125,7 \pm 0,28$  mm an und beschreiben eine Vergrößerung der Hufparameter, ausgenommen der Hufwinkel, proportional zum Körpergewicht.

**Tabelle 5: Variationsbreite des Vorderwandwinkels (Zehenrückenwinkels) von Vorder- und Hinterhufen unterschiedlicher Pferderassen (alphabetisch nach den Autoren geordnet)**

Literaturquelle	Vorderwandwinkel am Vorderhuf [in °]	Vorderwandwinkel am Hinterhuf [in °]	Pferderasse
FRIEDRICH (1931)	45 – 55	45 – 55	--*
HERZBERG (1996)	60	57	Shetlandpony
KAINER (1989)	48 – 60	50 – 62	--*
KIND (1961)	48 – 58	45 – 59	Przewalskipferd
KÖRBER (1989)	45 – 50	50 – 55	--*
LEU (1987)	64 50 56 48	65 56 52 53	Belgier Shire Hannoveraner Islandpony
NEUBERT (2001)	38 – 60	41 – 60	verschiedene Pferderassen und Nutzungsgruppen
O'GRADY und POUPARD (2003)	48 – 55	52 – 60	--*
SCHNITKER (2004)	44,54	48,9	Przewalskipferd
SCHROTH (2001)	50 – 55	50 – 55	Connemara Pony, irischer Hunter, englisches Vollblut
STUMP (1967)	45 – 50	50 – 55	--*
STASHAK (1989)	45 – 50	50 – 55	--*
THOMASON et al. (2001)	48 ± 1	48 ± 1	--*
VOGT (1938)	45 – 50	50 – 55	--*
WISSDORF et al. (1987)	52 ± 4	53 ± 4	--*

\*keine Angaben

## **6. Die Hornbildungsrate am Pferdehuf**

Mit zunehmendem Alter der Tiere nimmt die Hornbildungsrate ab. Dagegen hat das Geschlecht des Pferdes keinerlei Einfluss auf die Hornbildungsrate oder die Hornqualität (BUTLER u. HINTZ, 1977; HERZBERG, 1996; REILLY et al. 1998 a). Nach BECKER (1998) haben weder das Alter noch die Farbe eines Pferdes Einfluss auf die Hornbildungsrate des Hufes. Andererseits ist die Rasse des Pferdes ein Faktor mit Einfluss auf die Rate der Hornbildung. So weisen Islandponys geringere Hornbildungsraten auf als andere Pferderassen (LEU, 1987). Bei unbeschlagenen Pferdehufen ist eine höhere Hornbildungsrate als bei beschlagenen Hufen festgestellt worden, wobei Hinterhufe wiederum eine höhere Hornbildungsrate als Vorderhufe aufweisen. Ferner zeigen gemischtfarbige Hufe die geringste und helle Hufe die höchste Hornbildung, während sich die Hornbildungsrate dunklerer Hufe dazwischen befindet (BECKER, 1998).

Durch eine Durchblutungssteigerung der Huflederhaut, z. B. nach intensiver körperlicher Belastung oder einer hyperämisierenden Einreibung der Hufkrone, lässt sich eine quantitative Zunahme der Hornproduktion erreichen. Dabei nehmen Hornmasse und Bildungsrate pro Zeit der Hornproduktion zu, ohne dass dabei allerdings eine Verbesserung der Hornqualität erreicht wird. So ist bei Reitpferden, die täglich mehrere Stunden bewegt werden, die monatliche Hornbildungsrate erhöht (WINTZER, 1986). Ferner ist bei ad libitum gefütterten Ponys eine höhere mittlere Hornbildung zu beobachten als bei restriktiv gefütterten Ponys (BUTLER u. HINTZ, 1977). In einer kalten oder auch trockenen Umgebung, welche das Horn austrocknet, ist die Hornbildungsrate herabgesetzt (KAINER, 1989).

Zwischen den einzelnen Hufsegmenten verzeichnet LEU (1987) keinerlei Unterschiede in der Hornbildungsrate. Deshalb reichen zur Erfassung der Hornbildungsrate Messungen der Vorderwand des Zehenrückenteiles aus. Bei Therapieversuchen von mangelhafter Hornqualität ist die lange Huferneuerungszeit mit einzubeziehen. So muss bei Tragrandausbrüchen und bröckeligem, sprödem Horn nicht selten mit einem Zeitraum von ein bis zwei Jahren gerechnet werden, bis sich ein dauerhafter Therapieerfolg einstellt (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Bei chronischer Hufrehe folgt die Hufhornbildung einem charakteristischen Muster. Im Bereich des Zehenrückenteiles ist die Hornbildungsrate auf Grund von verminderter Durchblutung der Huflederhaut stark herabgesetzt, wohingegen sie im Trachtenbereich meist unverändert bleibt. Folglich kommt es zur Entstehung von Hornringen, welche von der Zehe zur Trachte hin divergieren (GOETZ, 1987, GROSENBAUGH et al., 1999). Die Hornbildungsraten und die Hufhornerneuerungszeit unterschiedlicher Pferderassen sind zusammengefasst in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Hornbildungsrate und Hufhornerneuerungszeit am Zehenrückenteil des Pferdehufes bei unterschiedlichen Pferderassen (alphabetisch nach den Autoren geordnet)**

Literaturquelle	Hornbildungsrate [mm/ 28 Tage]	Hufhornerneuerungszeit [Monate]	Pferderasse/Tierart
BECKER (1998)	4 – 15,5	---*	Warmblut
BUFFA et al. (1992)	---*	8	---*
BUTLER und HINTZ (1977)	7 – 11	---*	Shetlandpony
GEYER und SCHULZE (1994)	6 – 11	12	Warmblut
	4 – 5	15 – 20	Islandpony
	6 – 11	15	Belgier und Shire
HEDGES et al. (2001)	---*	15	Rind
HERZBERG (1996)	6,8	8	Shetlandpony
JOSSECK et al. (1995)	7	---*	Lipizzaner
KAINER (1989)	8 – 10**	12	---*
KNEZEVIC (1959)	8,75**	---*	verschiedene Pferderassen
LEU (1987)	8 – 9	14	Kaltblut
	8 – 9	12	Warmblut
	5	15 – 20	Islandpony
PATAN (2001)	4,8 – 6,42	5,8	Przewalskipferd
POLLITT (1990)	10	9	australisches Pony
RUTHE et al. (1997)	7 – 8	12 – 14	---*
SCHREYER (1997)	6,4	---*	dtsch. Reitpferd
STUMP (1967)	12,7**	9 – 12	---*
WHEELER (1966)	4	---*	Schaf
WINTZER (1986)	13 – 17	7 – 8,5	Warmblut

\*keine Angaben

\*\*Angaben in mm/Monat

## **7. Keratinisierung und Verhornung, Hornreifung und Hornalterung am Pferdehuf**

Die Struktur des Hufes, die sich qualitativ und quantitativ den lokalen Zug- und Druckbelastungen anpasst, wird durch die während der Keratinisierung und Verhornung herrschenden Bedingungen beeinflusst (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995). Jede Störung dieser Prozesse beeinflusst die Hornstruktur und -qualität maßgeblich (MÜLLING et al., 1999). Neben einer strukturell-funktionellen Gliederung des Kronhorns von innen nach außen bestehen auch strukturelle Unterschiede der gesamten Hufplatte in proximodistaler Richtung, die durch Reifungs- und Alterungsprozesse des Hufhorns hervorgerufen werden (KÖNIG u. BUDRAS, 2003). Die Differenzierung des Hornes verläuft in proximodistaler Richtung und beginnt mit der Keratinisierung (Synthesestadium) in der lebenden epidermalen Matrix (FROHNES u. BUDRAS, 2001; KÖNIG u. BUDRAS, 2003). Dieser Differenzierungsprozess beginnt im Stratum basale der Hufepidermis, welches an die Lederhaut grenzt, und die Zellvermehrung und den Zellnachschub sicherstellt (BOLLIGER u. GEYER, 1992; DE MOULIN, 1923; ELIAS u. FRIEND, 1975). Diese Neubildung der keratinisierenden Zellen steht im Gleichgewicht mit der oberflächlichen Abschilferung der toten, verhornten Zellen (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995). Nach der oben genannten Zellvermehrung beginnt die Keratinisierung dieser neu gebildeten Oberhautzellen und der Übergang in die Verhornung (Transformationsstadium) mit dem Einsetzen des programmierten Zelltodes (KÖNIG u. BUDRAS, 2003). Hierbei kommt es zur Bildung unlöslicher filamentöser Proteine (Keratinfilamente), der keratinfilament-assoziierten Proteine und des Interzellularkittes. Die Zellorganellen und Desmosomen werden intrazellulär durch die Enzyme der Membrane Coating Granules aufgelöst. Darauf folgen das Reifestadium, das Alterungsstadium und schließlich das Zerfallstadium der Hornzellen in der Hufkapsel (KÖNIG u. BUDRAS, 2003). Die finale Phase der Keratinozytenreifung ist abrupt und stellt sich im histologischen Schnitt als so genannte Verhornungsgrenze dar. Die Zellkerne zerfallen und verschwinden schließlich meist vollständig. Das Zytoplasma ist in dieser Phase von dicht gepackten Keratinfilamentbündeln gefüllt und die Zellen gehen mittels des Interzellularkittes einen festen Kontakt mit ihren Nachbarzellen ein und formen so eine schützende Barriere (POLLITT, 1998). Die verhornten Zellen besitzen schließlich weder einen Zellkern noch andere typische Zellorganellen (ELIAS u. FRIEND, 1975). Generell unterscheidet man vom histologischen sowie chemischen Standpunkt her zwischen zwei Typen der Verhornung (BOLLIGER u. GEYER, 1992; BUDRAS u. HUSKAMP, 1995), den so genannten harten und den weichen Verhornungstyp. Das Horn im Saumsegment des Hufes wird nach dem Prinzip der weichen Verhornung gebildet (LARSSON et al., 1956), während Kron-, Wand- und Sohlenhorn nach

dem Prinzip der harten Verhornung entstehen (PELLMANN et al., 1993). Im Zuge der harten Verhornung gehen die Zellen des Stratum spinosum ohne das Durchlaufen eines Stratum granulosum, wie es bei der weichen Verhornung vorkommt, unmittelbar in das Stratum corneum über (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Die harte Verhornung unterscheidet sich unter anderem von der weichen Verhornung in ihrer hohen Aufnahme von Cystin, Tyrosin und Threonin in die Außenschicht der keratogenen Zone, aber einer geringen Aufnahme von Histidin in diese Schichten (EKFALCK, 1990). Die Verhornung ist unter anderem ein Prozess der Austrocknung (DEMOULIN, 1923), der also mit erheblichem Wasserverlust einhergeht (NAUMANN et al., 1987). Die Keratinozyten im älteren Hufhorn durchlaufen eine Veränderung bezüglich ihrer Größe und zeigen dabei eine Schrumpfung im Wandsegment, die vermutlich aus diesem Flüssigkeitsverlust resultiert (BUDRAS u. HULLINGER, 1990). Die physiologische Kronhornalterung erfolgt distal der lebenden Anteile des Pferdehufes, also distal des Sohlenrandes des Hufbeines, weshalb die Schutzfunktion der Hufkapsel nicht beeinträchtigt wird. In diesem Bereich ist eine zunehmende Rissigkeit und Abnahme der Hornhärte zu beobachten (KÖNIG u. BUDRAS, 2003). Dieser Härteverlust ist sogar günstig für den Hornabrieb (PATAN, 2001), da beim Urwildpferd diese Abnahme der Hornhärte die Entstehung physiologischer Tragrandausbrüche und so den Selbstregulierungsmechanismus der Huflänge fördert (SCHNITKER, 2004). Der mit der Hornalterung einhergehende Markzerfall der Hornröhrchen ermöglicht in vorteilhafter Weise das Leichtbauprinzip, beeinträchtigt aber auf der anderen Seite die Barrierefunktion gegen aufsteigende Noxen (KÖNIG u. BUDRAS, 2003).

### **8. Krankhafte Veränderungen der Hufkapsel**

Eine gesunde Hufkapsel bietet den von ihr eingeschlossenen Strukturen Schutz vor biologischen, mechanischen und chemischen schädlichen Einflüssen aus der Umwelt (MÜLLING et al., 1997). Die meisten klinisch sichtbaren Hornläsionen sind ein Resultat schlechter Hornqualität (GREENOUGH, 1991). Störungen der Keratinisierung der Hufoberhautzellen führen häufig zur Bildung dyskeratotischen Horns. So kommt es beispielsweise zur Veränderung der Struktur und der Zusammensetzung der Hufoberhautzellen und des Interzellularkittes (MÜLLING u. BRAGULLA, 1997) und es folgt ein teilweiser oder gar vollständiger Verlust der protektiven Funktion der Hornkapsel (MÜLLING u. BUDRAS, 1998). Die Prädispositionsstellen für Erkrankungen des Hufes sind unter anderem das Kappenhorn und das Terminalhorn der weißen Linie und der Übergang

vom proximalen in den distalen Abschnitt des Ballensegmentes (BUDRAS et al., 1989). Mikrorisse treten bevorzugt am Übergang der Mittel- zur Innenzone des Kronhorns auf (BOLLIGER u. GEYER, 1992). Störungen der Mikrozirkulation der Lederhautgefäße haben Auswirkungen auf die epidermalen Strukturen des Hufes, da diese selbst gefäßfrei sind und die syntheseaktiven Hufoberhautzellen auf eine ausreichende Versorgung durch die Lederhautgefäße angewiesen sind. Als Folge nimmt die Menge des gebildeten, qualitativ minderwertigen Interzellularkittes stark zu und der Interzellularraum ist dadurch unregelmäßig und großblasig erweitert (MÜLLING et al., 1997; MÜLLING u. BUDRAS, 1998). So entsteht ein Verlust der Barrierefunktion und chemische Substanzen und Bakterien können in den Interzellularraum eindringen und dort fortschreitend den Interzellularkitt zerstören. So erfolgt eine weitere Herabsetzung der Adhäsions- und Barrierefunktion mit Bildung von Mikrorissen (MÜLLING, 1993). Werden die verhornenden Epidermiszellen infolge einer solchen Minderdurchblutung der Lederhaut nicht ausreichend versorgt, führt dieses zu einer Abnahme keratinogener Substanzen und einer veränderten Architektur des Hornzellverbandes. Solche dyskeratotischen Zellen synthetisieren in vermindertem Ausmaß die Keratinfilamente, welche nur noch zu dünnen, kurzen Bündeln aggregieren und das so aufgebaute Netzwerk wird unregelmäßig und grobmaschig (BRAGULLA u. MÜLLING, 1997).

Die sekundären Epidermisblättchen im Wandsegment des Hufes zeigen bei akuter Hufrehe sehr variable Einmündungswinkel in die primären Epidermisblättchen und im Spitzenbereich treten kolbige Verdickungen auf. Im Bereich dieser Verdickungen sind die Spinosazellen der Hufoberhaut völlig ungeordnet und teilweise formieren sich frühzeitig verhornte Zellen zu Hornperlen oder Horninseln. Die Oberhaut- und Lederhautblättchen werden krankheitsbedingt länger und sind im Gegensatz zu gesunden Hufen auffällig gewunden. Zudem kommt es zur Ausbildung einer deutlichen Kappenhornsicht, die teils aus bogenförmig aneinander gereihten Zellen (Arkaden) und teils aus Kappenhornröhrchen bestehen. Über den Firsten der Lederhautblättchen entstehen bis zu 10 solcher übereinander liegender Kappenhornröhrchen, die zur Diagnose einer ausgeheilten Hufrehe herangezogen werden können (MARKS u. BUDRAS, 1987). BOWKER (2003) beschreibt hingegen das Auftreten multipler Kappenhornröhrchen vermehrt bei beschlagenen Pferden im Bereich der Aufzüge der Hufeisen. Auch kommt es in diesem Zusammenhang zu einer Störung des Zellzusammenhaltes durch eine Verminderung der Anzahl der Desmosomen. Die im Zuge der Hufrehe entstehenden Hornzellen sind winzig und weisen eine glatte Oberfläche auf und somit keine Verzapfung zu den Nachbarzellen. Auch wird die Zell-zu-Zell-Adhäsion durch

die Bildung von minderwertigem Interzellularkitt zusätzlich beeinträchtigt (MARKS u. BUDRAS, 1987).

Die von SCHNITKER (2004) beschriebenen so genannten Riesenröhrchen entstehen möglicherweise durch eine lokale Hyperperfusion. Diese tritt bei einer lokalen Entzündung, wie z. B. nach einem Tritt gegen den Kronrand, aber auch im Zusammenhang mit der Hufrehe auf. Ein gesunder Pferdehuf besitzt eine glatte Hufwand ohne Rillen und Risse, ausgenommen Ringe, die regelmäßig um die ganze Hornwand und parallel zum Kronrand verlaufen (RUTHE et al., 1997). Diese physiologischen Ringe entstehen meist infolge von Veränderungen der Ernährung und werden deshalb als Futterringe bezeichnet. Dementsprechend entstehen bei sehr guter Ernährung Wülste und bei mangelhafter Ernährung Furchen und somit Ringe in der Hufwand (GUTENÄCKER, 1933). Zudem treten physiologische Hornringe in Zusammenhang mit dem Haarwechsel auf (RUTHE et al., 1997). Pathologische Hornringe können durch Verlagerungen der Kronlederhaut entstehen, wie sie nach Stauchungen, Entzündungen oder Lageveränderungen des Hufbeines vorkommen. Diese Art von Ringen verläuft gewöhnlich nicht parallel zum Kronrand (GUTENÄCKER, 1933). Außerdem treten pathologische Ringe im Rahmen einer Strahlfäule auf (RUTHE et al., 1997). Die typische Form der pathologischen Ringbildung tritt im Rahmen einer chronischen Hufrehe auf. Hierbei ist die Hornbildungsrate der dorsalen Zehenwand aufgrund verminderter Durchblutung der Lederhaut herabgesetzt, während die Hornbildungsrate des Trachtenteiles erhöht ist, was die Ausbildung von in Trachtenrichtung divergierenden Ringen zur Folge hat (GOETZ, 1987, GROSENBAUGH et al., 1999). Pathologische Ringe sind mitweilen auch an einzelnen Hufen als Folge von Überbelastung oder von lokalen Traumata zu beobachten. Durch systemische Erkrankungen oder Selenvergiftungen kommt es dagegen meist zur Ringbildung an allen vier Hufen. Eine Ringbildung an nur einer Seite des Hufes ist fast immer das Resultat von Stellungsanomalien (STASHAK, 1989).

### **9. Mineralstoff- und Spurenelementstatus im Blut von Pferden**

Abweichungen in den Serumkonzentrationen der Mengenelemente Kalzium, Phosphor und Magnesium sind bei Pferden von untergeordneter Bedeutung. Dagegen können Veränderungen der Gehalte der verschiedenen Spurenelemente im Serum Einflüsse auf die Struktur (und Funktionen) des Pferdehufes haben. So sinken Eisen- und Zinkserumwerte häufig krankheitsbegleitend ab, ohne dass dabei gleichzeitig ein Mangel vorherrscht. Aus gleichem Grund steigen die Kupferserumwerte häufig an. Niedrige Zinkserumwerte treten



zwar oft als Begleiterscheinung von Erkrankungen auf, können aber auch ein Hinweis auf einen primären oder sekundären Mangel sein (WOLF u. GERST, 2005). Zink- und Selenmangel sind vermutlich ein verbreitetes Problem in der modernen Pferdehaltung. So existieren vielfach Zink- und Selenunterversorgungen bei Islandponys. Zinkmangel ist vor allem ein Problem in der extensiven Weidehaltung von Pferden. Dagegen entwickeln extensiv gehaltene Pferde selten Kupfermangel, wobei ein Selenmangel oft bei Pferden zu beobachten ist, welche auf sandhaltigen Böden leben.

Im Hinblick auf den Serumphosphorgehalt weisen juvenile Pferde physiologisch höhere Werte als adulte Tiere auf (WOLF u. GERST, 2005).

Trotz identischer Fütterungs- und Nutzungsbedingungen können erhebliche individuelle Unterschiede im Selenstatus bei Pferden innerhalb einer Herde auftreten. Daher ist die Aussagekraft einer Einzeluntersuchung eines zufällig ausgewählten Tieres eingeschränkt. Pferde, die überwiegend mit Grundfuttermitteln wie Gras, Heu oder Getreide versorgt werden, weisen eine deutlich geringere Selenversorgung auf als Pferde, die zusätzliches Kraft- oder Mineralfutter erhalten. Unabhängig von der Fütterung scheint auch das Alter einen Einfluss auf den Selengehalt im Organismus des Pferdes zu haben (VERVUERT et al., 2000). Weitere Faktoren, die den Selenstatus unabhängig von der Fütterung beeinflussen können, sind Rasse (HAYES et al., 1987) und Geschlecht (CRISMAN et al., 1994) des Tieres. Bezüglich des Zink-, Kupfer- und Selenplasmaspiegels besteht keine direkte Abhängigkeit von der jeweiligen Versorgung über das Futter (WICHERT et al., 2002). Die folgenden Tabellen 7 und 8 geben einen Überblick über die Gehalte von Mineralstoffen und Spurenelementen im Blut bzw. im Serum von Pferden.

**Tabelle 7: Mineralstoff- und Spurenelementgehalte im Blut von Pferden verschiedener Rassen und Altersgruppen (WOLF u. GERST, 2005)**

Mineralstoff	Messwert	Toleranzbereich
Kalzium	2,84 ± 0,53 mmol/l	2,50 – 3,40 mmol/l
Magnesium	0,82 ± 0,10 mmol/l	0,70 – 0,90 mmol/l
Phosphor	1,55 ± 0,70 mmol/l	0,70 – 1,50 mmol/l
Kupfer	20,43 ± 4,43 µmol/l	18 – 22 µmol/l
Eisen	30,25 ± 10,75 µmol/l	18 – 35 µmol/l
Zink	12,50 ± 6,05 µmol/l	15 – 30 µmol/l

**Tabelle 8:****Elektrolyte und Spurenelemente im Blutserum  
gesunder Pferde (SCHÄFER, 1999)**

Parameter	Referenzbereich
Kalzium	2,5 – 3,4 mmol/l
Magnesium	0,7 – 0,9 mmol/l
Phosphor, anorganisch	0,7 – 1,4 mmol/l
Kupfer	19 – 21 µmol/l
Eisen	13 – 25 µmol/l
Selen	1,3 – 2,5 µmol/l
Zink	11 – 15 µmol/l
Natrium	125 – 150 mmol/l
Kalium	2,8 – 4,5 mmol/l