

V. DISKUSSION

Das Przewalskipferd ist hervorragend geeignet, um domestikationsbedingte Veränderungen zu untersuchen, da es nach übereinstimmender Meinung verschiedener Autoren (BENECKE, 1998; HERRE, 1961; NOBIS, 1971 u. 1974; PICK, 1994; RÖHRS u. EBINGER, 1998; THENIUS, 1966; VOLF, 1996; WEBER, 1912) als einzige heute noch lebende Stammform der domestizierten Pferde gilt. Ein Schwerpunkt der Diskussion ist daher die Gegenüberstellung der eigenen Untersuchungsergebnisse und der Literaturangaben über das Hufhorn von Hauspferden, um zu klären, ob - und gegebenenfalls in welchem Ausmaß - sich der Pferdehuf im Laufe der Domestikation verändert hat. Berücksichtigt wurde dabei die Hornbildung, der Hornverlust sowie die Hornqualität des Kronhornes am Rückenteil der Hufplatte. Als zweiter Schwerpunkt sollen die jeweiligen Einflussfaktoren diskutiert werden, wobei die jahreszeitlichen Einflüsse von besonderem Interesse sind, da bei den untersuchten Przewalskipferden erhebliche saisonal bedingte Unterschiede festgestellt werden konnten. Vor der Diskussion der erhobenen Befunde soll kurz auch auf die angewandten Methoden eingegangen werden.

Diskussion der Methodik

In der vorliegenden Studie wurden erstmals verhaltensbiologische und morphologische Untersuchungen kombiniert. Auf diese Weise war es möglich, den Einfluss von bestimmten verhaltensbedingten Biorhythmen der Przewalskipferde (Bewegungsaktivität und Gewichtsentwicklung) auf die Hufhornproduktion und den Hornverlust zu untersuchen sowie den Zusammenhang zwischen der Hornbildungsrate und der Hornqualität darzustellen. Dabei ist mit Sicherheit von Vorteil, dass mit den Urwildpferden ein verhältnismäßig homogenes Untersuchungsmaterial vorliegt. Alle heute lebenden Przewalskipferde (weltweit etwa 1600 Tiere) stammen nämlich von nur 13 Individuen ab, die am Anfang des 20. Jahrhunderts gefangen und nach Europa transportiert wurden (RÖHRS u. EBINGER, 1998; VOLF, 1996). Infolgedessen ist die Variabilität innerhalb der Wildpferde-Population eher gering.

Die Bestimmung der Hornbildungsrate wurde bei den untersuchten Przewalskipferden lediglich am Hufrücken vorgenommen, da nach LEU (1987) die Hufhornproduktion an dieser Lokalisation repräsentativ für die gesamte Hufplatte ist. Als Maß für die Hornbildungsrate kann die Zunahme des Abstandes zwischen dem Kronrand und einer Markierung an der Hufplatte angesehen werden. Durch die Messung des Abstandes zwischen der Markierung und dem Tragrand lässt sich außerdem der Hornverlust ermitteln. Bei den Przewalskipferden wurden die Markierungen mit Hilfe eines Lötkolbens angebracht, weil damit die Manipulation an den Hufen auf ein Minimum reduziert werden konnte. Das war aufgrund der Unberechenbarkeit der Pferde wichtig, denn die Markierung erfolgte nur in Ausnahmefällen unter Narkose, wenn die Tiere anlässlich eines Transportes betäubt wurden. Von den markierten Hufen wurden monatlich Videoaufnahmen bzw. Diapositive angefertigt, da anders als bei Hauspferden eine direkte Messung an den Hufen der Wildpferde nicht möglich war.

Anhand eines Maßstabes, der ebenfalls am Rückenteil der Hufplatte angebracht wurde, konnten zwar die im Bild gemessenen Abstände auf die realen Verhältnisse umgerechnet werden, eine gewisse Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Hornbildungsrate ist jedoch dadurch gegeben, dass der Kronrand stets durch Haare verdeckt war. Ein möglicher systematischer Fehler bei der Ermittlung des Abstandes zwischen Markierung und Kronrand dürfte nicht weiter zum Tragen kommen, da für die Bestimmung der Hornbildungsrate lediglich die monatliche Differenz ausschlaggebend ist. Um einen möglichen zufallsbedingten Fehler zu minimieren, wurde die Studie in großem Umfang angelegt, wobei insgesamt 781 Einzeldaten zur monatlichen Hornbildungsrate erhoben wurden.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle ergibt sich daraus, dass die auf diese Weise ermittelte durchschnittliche Hornbildungsrate nicht ohne weiteres auf andere Przewalskipferde übertragbar ist, da neben individuellen Abweichungen auch haltungs- und fütterungsbedingte Unterschiede nicht auszuschließen sind. Aus diesem Grund konnte der Zeitpunkt der Hornbildung an den Hufen der 10 Przewalskipferde, die für die Qualitätsuntersuchung herangezogen wurden, lediglich geschätzt werden. Mit "Sommerhorn" bzw. "Winterhorn" wurde dabei jenes Kronhorn bezeichnet, das höchstwahrscheinlich in der entsprechenden Jahreszeit gebildet wurde.

Auch die Methodik zur Bestimmung des reinen Hornabriebes muss kritisch betrachtet werden, da nicht nur die durch Tragrandausbrüche bedingten Hornverluste unberücksichtigt blieben, sondern auch die Tatsache, dass sich die Fußungsfläche infolge der Ausbrüche verändert. Es muss davon ausgegangen werden, dass der an der Ausbruchsstelle gemessene Hornabrieb aufgrund der fehlenden oder zumindest reduzierten Bodenreibung geringer ist als der Hornabrieb am Tragrand.

Da die Qualität des Hufhornes durch komplexe Differenzierungsprozesse der verhornenden Epidermis bestimmt wird (FROHNES, 1999), ist ihre Untersuchung und aussagekräftige Beurteilung nur durch den Einsatz eines umfangreichen Methodenspektrums möglich. Daher wurde neben einer Materialprüfung auch eine Untersuchung der strukturellen Parameter (Hornarchitektur, inter- und intrazelluläre Faktoren) vorgenommen, die nach PELLMANN et al. (1993) Einfluss auf die Hornqualität ausüben.

Von den zahlreichen in der Literatur genannten Materialprüfungsmethoden zur Bestimmung der mechanischen Horneigenschaften wurde der Untersuchung der Hornhärte der Vorzug gegeben, weil sich damit nach MÜLLING (1993) und PELLMANN et al. (1993) die bei der Fußung auftretende physiologische Druckbelastung des Kronhornes imitieren lässt. Die Härtemessung wurde mit Hilfe des Prüfgerätes nach SHORE C (normiert nach ASTM D 2240) vorgenommen, das den Widerstand des Hornes gegen das Eindringen eines verhältnismäßig kleinen Eindringkörpers misst. Aufgrund der geringen Größe des Mess-Stiftes kann es nach MÜLLING (1993) dazu kommen, dass örtliche Schwankungen der Hornhärte erfasst werden, die für die eigentlichen Horneigenschaften nicht repräsentativ sind. Um diesen Nachteil auszugleichen, wurden an jeder Hornprobe drei Messungen durchgeführt und anschließend

der Mittelwert berechnet. Neben der einfachen Durchführbarkeit der Härtemessung bietet das verwendete Härteprüfgerät den Vorteil, dass eine Bestimmung der Hornhärte auch im Feldversuch möglich ist. Das Gerät ist zwar nach HOCHSTETTER (1998) für die Härtemessung am zerklüfteten Ballenhorn der Rinderklaue ungeeignet, bei der Anwendung am harten äußeren Kronhorn der untersuchten Przewalskipferde konnten jedoch reproduzierbare Ergebnisse ermittelt werden. Es fällt allerdings auf, dass die durchschnittliche Härte im Feldversuch um etwa 4 SHORE C-Einheiten geringer ist als unter Laborbedingungen. Diese Abweichung ist vermutlich zum einen durch individuelle Unterschiede der untersuchten Pferde bedingt, zum anderen kann beim Feldversuch aufgrund der manuellen Anwendung des Gerätes auch ein methodisch bedingter Fehler nicht ausgeschlossen werden.

Die Feuchtigkeitsparameter wurden analog zu den von SPITZLEI (1996) durchgeführten Untersuchungen gravimetrisch bestimmt. Zur Untersuchung der Hornfeuchte im Feldversuch wurde zunächst außerdem die von STERN (2000) vorgeschlagene Methode der Feuchtigkeitsbestimmung mittels eines Holzfeuchtigkeitsmessgerätes, das die elektrische Leitfähigkeit eines Materials misst, angewandt. Diese Methode erwies sich jedoch als unbrauchbar, da sich die Messelektroden im harten äußeren Kronhorn nicht tief genug eindrücken lassen, so dass das Gerät lediglich die in Abhängigkeit von den jeweiligen Witterungsbedingungen erheblich schwankende Oberflächenfeuchte des Hornes angibt.

Für die Untersuchung der Hornstruktur wurden Methoden ausgewählt, die eine Beurteilung der Hornarchitektur sowie der inter- und intrazellulären Faktoren ermöglichen. Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung wurde durchgeführt, da sich damit das Oberflächenrelief der Huflederhaut und die davon abhängende Architektur der Epidermis dreidimensional darstellen lassen. Die histometrisch erfassbaren Parameter der Hornarchitektur sowie das histochemische Reaktionsverhalten der verhornten Epidermiszellen und des Interzellularkittes wurden lichtmikroskopisch ermittelt, die Ultrastruktur der Hornzellen und des Kittes wurden transmissionselektronenmikroskopisch untersucht. Dabei wurden vorwiegend "Nativschnitte" verwendet, die von unbehandelten Hornblöckchen abgenommen wurden. Ein derartiges Vorgehen ist möglich, weil das Hufhorn aus abgestorbenen Zellen besteht und somit die Autolyse nicht durch eine Fixation verhindert werden muss. Außerdem besitzt das Hufhorn eine ausreichende Eigenhärte, so dass auch die Aushärtung der Proben sowie ihre Einbettung in Epon nicht erforderlich sind. Diese erstmals für die Elektronenmikroskopie angewandte Methode bietet neben einer erheblichen Zeiteinsparung den Vorteil, dass fixierungs- und einbettungsbedingte Artefakte vermieden werden und außerdem die Antigenität des Gewebes erhalten bleibt.

Für die histometrische Untersuchung der Hornarchitektur wurden verhältnismäßig dicke "Nativschnitte" verwendet, weil der Markanteil der Hornröhrchen auf diese Weise weitgehend erhalten bleibt, während das Röhrchenmark einschließlich der angrenzenden Rindenzellen in dünneren Schnitten häufig herausgerissen werden. Um einen methodisch bedingten Fehler bei der Darstellung von jahreszeitlichen Unterschieden der Röhrchenparameter zu vermeiden,

wurden jeweils verschiedene Abschnitte von ein und denselben Hornröhrchen vermessen. Aufgrund des geringen Probenumfangs müssen die in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Hornbildung festgestellten Unterschiede der Hornarchitektur dennoch kritisch betrachtet werden. Da jedoch auch KÖNIG (in Vorb.) bei Warmblutpferden entsprechende Schwankungen der Hornstruktur beobachtet, ist eine zufallsbedingte Veränderung der Röhrchenparameter eher unwahrscheinlich.

Die Methode der Wahl für die Analyse der Proteinzusammensetzung des Hufhornes ist nach HOCHSTETTER (1998) die Elektrophorese, weshalb außerdem eine gelelektrophoretische Untersuchung mit anschließendem Western-Blotting durchgeführt wurde. Die für die Proteinextraktion gewählte Methode sowie die zur Identifikation einiger Zytokeratine eingesetzten Antikörper wurden bereits erfolgreich am Ballenhorn der Rinderklaue (HOCHSTETTER, 1998) und am Sohlen-, Ballen- und Strahlhorn des Pferdhufoes (FROHNES, 1999) eingesetzt.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Kombination der mechanisch-physikalischen Materialprüfung mit den Untersuchungen der Hornstruktur eine umfassende Beurteilung der Hufhornqualität ermöglicht. Da auch geringe Veränderungen der Horneigenschaften erfassbar sind, eignen sich die angewandten Methoden hervorragend, um die Wirkung von bestimmten Einflussfaktoren auf die Hornqualität zu untersuchen.

Diskussion der Befunde

Die **monatliche Hornbildungsrate** von Hauspferden ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen, da sie für die Berechnung der Huferneuerungszeit von Bedeutung ist und sich somit Prognosen über die Heilungsdauer bei Huferkrankungen wie z.B. Hornspalten ableiten lassen. Bei der Vielzahl von Literaturangaben zur Hufhornbildung fällt eine große Variationsbreite auf. So stellt BECKER (1998) bei Warmblutpferden eine Hornbildungsrate zwischen 4 - 15,5 mm / 28 Tage fest, nach KNEZEVIC (1959), der unterschiedliche Pferderassen untersuchte, schwankt sie sogar zwischen 2 - 25,5 mm / Monat. Diese erheblichen Unterschiede hängen vermutlich mit der genetischen Disposition zusammen, die sowohl individuelle als auch rasseabhängige Schwankungen der Hornbildungsrate bedingt (LEISERING u. HARTMANN, 1876; LEU, 1987). Im Gegensatz zu den Hauspferden ist bei den untersuchten Przewalskipferden nur eine geringe Variabilität festzustellen. So weist die monatliche Hornbildungsrate des äußeren Kronhornes bei den einzelnen Tieren im Jahresmittel Werte zwischen 4,80 - 6,42 mm / 28 Tage auf, wobei sich ein Durchschnittswert von $5,81 \pm 2,10$ mm / 28 Tage berechnen lässt. Da die Hornbildungsrate von der genetischen Disposition beeinflusst wird, hängen die relativ geringen Unterschiede zwischen den einzelnen Przewalskipferden sicherlich mit dem hohen Inzuchtgrad innerhalb der Wildpferd-Population zusammen.

Bei der Gegenüberstellung der eigenen Untersuchungsergebnisse und der Literaturangaben zur Hornbildungsrate beim Hauspferd muss berücksichtigt werden, dass die Przewalskipferde mit einer Widerristhöhe von 130 - 145 cm (VOLF, 1996) und einem Gewicht von etwa

250 - 450 kg eher Kleinpferden bzw. größeren Ponys entsprechen. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, sollen die bei den Przewalskipferden ermittelten Werte daher vornehmlich mit der monatlichen Hufhornproduktion bei verschiedenen Kleinpferderassen (z.B. Islandpony, australisches Pony und Haflinger) verglichen werden. Für diese Pferderassen wird in der Literatur eine Hornbildungsrate zwischen 4 - 11 mm / 28 Tage angegeben (GEYER u. SCHULZE, 1994; LEU, 1987; POLLITT, 1990; RICHTER, 1990). Die bei den Przewalskipferden festgestellte Hornbildungsrate liegt somit im Schwankungsbereich der für die unterschiedlichen Kleinpferderassen ermittelten Werte. Hinsichtlich des Jahresdurchschnitts der Hufhornproduktion lässt sich demzufolge keine domestikationsbedingte Beeinflussung nachweisen.

Neben der genetischen Disposition werden zahlreiche weitere Einflussfaktoren diskutiert. Ein *anatomisch bedingter Einfluss* auf die Hufhornproduktion von Hauspferden ist umstritten. Während die Hornbildungsrate nach Meinung einiger Autoren (BECKER, 1998; BUTLER u. HINTZ, 1977; SCHREYER, 1997) an den Hufen der Hintergliedmaßen verschiedener Pferderassen höher ist als an denen der Vordergliedmaßen, können weder HERZBERG (1996) bei Shetlandponys noch RICHTER (1990) bei Haflingern derartige Unterschiede feststellen. In Übereinstimmung mit den letztgenannten Autoren ist auch bei den untersuchten Przewalskipferden kein Unterschied der Hufhornproduktion an den Vorder- und Hinterhufen erkennbar.

Auch zum Einfluss des *Alters* finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben. So beobachten verschiedene Autoren (BUTLER u. HINTZ, 1977; KNEZEVIC, 1959; JOSSECK, 1991; RICHTER, 1990) bei jüngeren Tieren eine deutlich höhere Hornbildungsrate als bei älteren Pferden. In einer relativ umfangreichen Untersuchung kommt BECKER (1998) jedoch zu dem Schluss, dass die Hornbildungsrate nicht vom Alter der Pferde beeinflusst wird. Auch bei den untersuchten Przewalskipferden ist eine altersbedingte Beeinflussung der Hornbildungsrate nicht nachweisbar.

Der Einfluss des *Geschlechtes* auf die Hornbildungsrate konnte nicht hinreichend geklärt werden, weil für die Untersuchung lediglich ein Przewalskihengst zur Verfügung stand.

Während die bisher genannten Faktoren keinen nachweisbaren Effekt auf die Hufhornproduktion der Przewalskipferde ausüben, lässt sich bei allen untersuchten Tieren eine deutliche Beeinflussung in Abhängigkeit von der **Jahreszeit** feststellen. So ist die Hornbildungsrate im Sommer (Juli bis September) mit durchschnittlich $7,62 \pm 1,36$ mm / 28 Tage wesentlich höher als in den Wintermonaten (Januar bis März), für die sich lediglich ein Durchschnittswert von $3,71 \pm 1,39$ mm / 28 Tage berechnen lässt.

Bei Hauspferden wurde die Jahreszeit als Einflussfaktor der Hufhornproduktion bisher kaum berücksichtigt. Infolgedessen existieren nur wenige Literaturangaben über entsprechende jahreszeitlich bedingte Unterschiede, obwohl sich zahlreiche Autoren mit der Hornbildungsrate am Pferdehuf beschäftigt haben. Bei einer Gegenüberstellung mit den eigenen Untersuchungsergebnissen fällt auf, dass die jahreszeitlichen Schwankungen bei den

untersuchten Przewalskipferden erheblich deutlicher ausgeprägt sind als bei Hauspferden. So ist die Hornbildungsrate bei den untersuchten Przewalskipferden im Sommer um durchschnittlich 3,91 mm / 28 Tage höher ist als im Winter, während GEYER und SCHULZE (1994) in Übereinstimmung mit LEU (1987) bei verschiedenen Pferderassen lediglich einen Unterschied der Hornbildungsrate von 1 - 2 mm / 28 Tage beobachten. Bei Lipizzanerpferden stellt JOSSECK (1991) einen jahreszeitlich bedingten Unterschied von ca. 1,5 mm / 28 Tage fest, RICHTER (1990) beschreibt bei Haflingern eine Differenz von 2 – 3 mm / 28 Tage. Auch bei Pferden der Rasse Deutsches Reitpferd ist die Hornbildungsrate nach SCHREYER (1997) im Winter niedriger als im Sommer, der Unterschied beträgt jedoch nur 0,4 mm / 28 Tage. Entscheidend für diese Abweichungen zwischen Haus- und Przewalskipferden sind sicherlich die unterschiedlichen Haltungsbedingungen. Die ganzjährig im Semireservat gehaltenen Przewalskipferde sind den jahreszeitlichen Einflüssen wesentlich intensiver ausgesetzt als die Hauspferde, die hierzulande größtenteils im Stall gehalten werden. Aus diesem Grund ist es nicht verwunderlich, dass der jahreszeitlich bedingte Unterschied der Hornbildungsrate bei den untersuchten Przewalskipferden größer ist als die in der Literatur zum Hauspferd angegebenen Werte. Der Einfluss der Haltung auf die Ausbildung eines Jahresrhythmus wird auch durch die Untersuchung von SCHEIBE et al. (1999) deutlich. So sind jahreszeitliche Unterschiede hinsichtlich des Körpergewichtes, der Bewegungsaktivität sowie der Nahrungsaufnahmedauer bei einer Haltung der Przewalskipferde in Zoologischen Gärten, die mit der Stallhaltung von Hauspferden durchaus vergleichbar ist, kaum ausgeprägt. Werden die Pferde in Semireservate verbracht, entwickelt sich nach einer gewissen Anpassungszeit ein deutlicher Jahresrhythmus (BERGER et al., 1999; SCHEIBE et al., 1999). Ob auch die jahreszeitlichen Schwankungen der Hornbildungsrate bei Przewalskipferden, die in Zoologischen Gärten gehalten werden, geringer sind als bei den im Semireservat gehaltenen Pferden, ist durch nachfolgende Untersuchungen zu klären.

Die jahreszeitlichen Unterschiede der Hufhornproduktion sind durch mehrere Faktoren bedingt. Eine bedeutende Rolle spielt sicherlich die Umgebungstemperatur. So wird von GEYER und SCHULZE (1994) in Übereinstimmung mit TIMM (1993) ein Zusammenhang zwischen der niedrigen Umgebungstemperatur im Winter und der verminderten Hornproduktion am Pferdehuf vermutet. Ein vergleichbarer Effekt der Umgebungstemperatur auf die Hornproduktion wird auch für die Rinderklaue (HAHN et al., 1986; MACCALLUM et al., 1998) und für den menschlichen Fingernagel (GEOGHEGAN et al., 1958) beschrieben. Um zu überprüfen, ob ein derartiger Zusammenhang auch bei den untersuchten Przewalskipferden festzustellen ist, wurde parallel zur Untersuchung der Hornbildungsrate auch die Lufttemperatur im Semireservat Schorfheide gemessen. Bei der Gegenüberstellung der beiden Merkmale kann zwar eine hohe positive Korrelation festgestellt werden, eine direkte Beeinflussung der Hornbildung durch die Umgebungstemperatur lässt sich daraus allerdings nicht ableiten. Vielmehr könnte die Übereinstimmung des Jahresganges von Umgebungstemperatur und Hufhornproduktion auch durch das Einwirken eines weiteren Faktors (z.B.

durch die Tageslichtlänge) bedingt sein, der zufällig beide Merkmale im gleichen Sinne verändert. Die Bedeutung der Temperatur für das Ausmaß der Hornbildung wird jedoch durch die Untersuchung von WHEELER et al. (1972) verdeutlicht, die bei Schafen, die unter klimatisierten Bedingungen gehalten wurden, einen kausalen Zusammenhang zwischen einer niedrigen Umgebungstemperatur und einer reduzierten Hornproduktion nachweisen können. Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen sehen WHEELER et al. (1972) in der *Verlangsamung von temperaturabhängigen biochemischen Reaktionen* bei niedrigen Temperaturen. Von besonderer Bedeutung sind allerdings auch *vasomotorische Veränderungen*. So ist nach GEOGHEGAN et al. (1958) die reduzierte Hornbildungsrate bei niedriger Umgebungstemperatur als eine normale physiologische Anpassung des peripheren Kreislaufes an das kalte Klima zu sehen. Bei niedrigen Umgebungstemperaturen wird nämlich zur Vermeidung von Wärmeverlusten und zur Konstanterhaltung der Körperkerntemperatur eine oberflächliche Vasokonstriktion bewirkt (MOGG u. POLLITT, 1992), die zu einer Reduktion des peripheren Blutflusses führt. Davon sind insbesondere die Extremitäten betroffen, da die Gliedmaßen eine große Oberfläche für etwaige Wärmeverluste bieten (ROBINSON, 1990). Der Blutfluss im Kapillarbett der Huflederhaut, der für die Ernährung der gefäßfreien Hufepidermis bedeutsam ist, kann durch das temperaturabhängige Öffnen von arteriovenösen Anastomosen noch weiter reduziert werden. Das Vorkommen derartiger Gefäßbrücken in der Huflederhaut wird von zahlreichen Autoren beschrieben (MARAIS u. MASTY, 1988; MOGG u. POLLITT, 1992; MOLYNEUX et al., 1994; NICKEL, 1941; POLLITT, 1990; POLLITT u. MOLYNEUX, 1990; ROBINSON, 1990; SCHUMMER, 1949), die sich zur Klärung der Pathogenese der Hufrehe intensiv mit der Blutgefäßversorgung und Mikrozirkulation am Huf beschäftigt haben. Besonders hoch ist die Dichte der arteriovenösen Anastomosen mit 500 / cm² in der Wandlerhaut des Pferdes (POLLITT, 1993a), aber auch in der Kronlederhaut sind zahlreiche arteriovenöse Anastomosen ausgebildet, die sich nach NASU et al. (1998) sowie POLLITT und MOLYNEUX (1990) insbesondere an der Zottenbasis befinden und somit dem Kapillarbett vorgeschaltet sind. Die kapilläre Durchblutung der Huflederhaut ist daher abhängig vom Öffnungszustand dieser arteriovenösen Verbindungen (NICKEL, 1941; SCHUMMER, 1949). Ist das Lumen der arteriovenösen Anastomosen verlegt, kann das Blut zur Ernährung der gefäßfreien Hufepidermis durch das Kapillarbett der Huflederhaut strömen. Bei einer Dilatation der arteriovenösen Anastomosen, die der lokalen Thermoregulation dient, nimmt es hingegen den Weg des geringsten Widerstandes und umgeht auf diese Weise das Kapillarbett (MOLYNEUX et al., 1994; POLLITT, 1990; ROBINSON, 1990; SCHUMMER, 1949). Durch ein intermittierendes Öffnen der arteriovenösen Anastomosen bei niedrigen Umgebungstemperaturen gelangt somit warmes arterielles Blut in die Peripherie, wodurch die Temperatur im Huf über der kritischen Grenze gehalten wird (MOGG u. POLLITT, 1992; MOLYNEUX et al., 1994; POLLITT, 1993a; ROBINSON, 1990). Aufgrund der großen Anzahl von arteriovenösen Anastomosen am Huf können Pferde daher lange Zeit auf Eis und Schnee stehen, ohne Erfrierungen zu zeigen (MOLYNEUX et al., 1994; POLLITT, 1993b). Eine derartige

kälteinduzierte Vasodilatation ist auch an den Ohren und Fingern von Menschen bekannt und verhindert vermutlich ebenfalls das Erfrieren an den Füßen von Polarvögeln (MOLYNEUX et al., 1994; POLLITT, 1993a). Das periodische Öffnen der arteriovenösen Anastomosen bei Kälte bedingt andererseits aber auch eine intermittierende Minderdurchblutung im Kapillarbett der Huflederhaut. Infolgedessen kommt es im Winter zu einer beeinträchtigten Versorgung der hornproduzierenden Epidermiszellen mit Sauerstoff und Nährstoffen, die nach Meinung verschiedener Autoren (GEYER u. SCHULZE, 1994; HAHN et al., 1986; POLLITT, 1993a; TIMM, 1993; VERMUNT u. GREENOUGH, 1995) der Grund für die reduzierte Proliferationsrate der Hufepidermis ist. Die gesteigerte Hornproduktion im Sommer ist demzufolge unter anderem auf eine verbesserte Blutversorgung der Huflederhaut zurückzuführen. Einen Hinweis darauf, dass die dermale Durchblutung tatsächlich einen entscheidenden Einfluss auf die epidermale Hornbildung ausübt, liefern die Untersuchungen von BECKER (1998) und WINTZER (1986). Die Autoren stellen nämlich nach einer Einreibung des Kronrandes mit hyperämisierenden Salben eine Erhöhung der Hornbildungsrate in der Kronepidermis fest.

Im gleichen Sinne wirkt nach WINTZER (1986) eine Durchblutungssteigerung der Huflederhaut aufgrund einer intensiven körperlichen Bewegung der Pferde. Ein derartiger Zusammenhang zwischen der Bewegungsaktivität und der Hufhornproduktion ist auch bei den untersuchten Przewalskipferden wahrscheinlich, denn ähnlich wie die Hornbildungsrate unterliegt auch die motorische Aktivität der im Semireservat Schorfheide-Liebenthal gehaltenen Przewalskipferde einer deutlichen Jahresrhythmik mit Maximalwerten im Sommer und Minimalwerten in den Wintermonaten (BERGER et al., 1999; SCHEIBE et al., 1999). Trotz der hohen positiven Korrelation, die sich für die untersuchten Przewalskipferde zwischen der Bewegungsaktivität und der Hufhornproduktion berechnen lässt, ist die Schlussfolgerung eines kausalen Zusammenhanges nicht zulässig, da die Ähnlichkeit des Jahresganges der beiden Merkmale auch zufallsbedingt sein könnte. Außerdem ist insbesondere in der ersten Jahreshälfte keine vollständige Übereinstimmung zwischen dem Jahresgang der Hufhornbildung und dem der Bewegungsaktivität der Przewalskipferde gegeben. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass für die Ausbildung der jahreszeitlichen Schwankungen andere Faktoren bedeutender sind als die motorische Aktivität der Pferde. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt TIMM (1993), der einen saisonalen Unterschied der Hufhornproduktion auch bei gleichmäßiger Bewegung der Pferde feststellt. Dennoch kann eine gewisse Beeinflussung der Hornbildungsrate durch die Bewegungsaktivität nicht ausgeschlossen werden. Es erscheint sogar sehr wahrscheinlich, dass der bei den Przewalskipferden beobachtete Jahresrhythmus der monatlichen Hornbildungsrate zwar durch andere Faktoren ausgelöst wird, die Bewegungsaktivität aber einen modulierenden Einfluss ausübt, indem sie die Jahresrhythmik der Hornbildung verstärkt.

Ein weiterer saisonaler Faktor mit Einfluss auf die Hufhornproduktion ist die Tageslichtlänge. Sie ist nicht nur für die Temperaturschwankungen im Laufe eines Jahres verantwortlich,

sondern beeinflusst die Proliferationsrate der Hufepidermis auch direkt über die Ausschüttung von *Hormonen*. Eine besondere Bedeutung kommt sicherlich dem Prolaktin zu, denn nach LINCOLN und RICHARDSON (1998) besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen der Hornbildungsrate und der Blutkonzentration dieses Hormons. Die Freisetzung des Prolaktins aus der Hypophyse wird durch Melatonin reguliert, das in Abhängigkeit von der Tageslichtlänge in der Zirbeldrüse (Epiphyse) gebildet und ins Blut abgegeben wird (LINCOLN u. CLARKE, 1995). Infolgedessen ist auch die Blutkonzentration des Prolaktins von der Tageslichtlänge abhängig, wobei unter natürlichen Lichtbedingungen im Sommer hohe und im Winter niedrige Werte zu verzeichnen sind (LINCOLN, 1998). Daneben besteht nach GEBBIE et al. (1999) auch eine positive Korrelation zwischen der Prolaktinkonzentration des Blutes und der Umgebungstemperatur. Bei den Przewalskipferden dürften diese Licht- und Temperatur-induzierten Schwankungen des Prolaktinspiegels zur Ausbildung des Jahresrhythmus der Hufhornproduktion beigetragen haben.

Daneben übt nach LINCOLN und RICHARDSON (1998) vermutlich auch das Wachstumshormon (growth hormone) einen stimulierenden Effekt auf die Hornbildung aus. Die Sekretion dieses Hormons aus der Hypophyse wird ebenfalls durch Melatonin gesteuert. Demzufolge ist auch die Blutkonzentration des Wachstumshormons abhängig von der Tageslichtlänge, wobei sich ähnlich wie bei der Prolaktinkonzentration unter natürlichen Lichtbedingungen im Sommer hohe und im Winter niedrige Werte nachweisen lassen. In der Leber induziert das Wachstumshormon die Sekretion des Wachstumsfaktors IGF₁ (insulin-like growth factor 1, Somatomedin C), der eine mitogene Aktivität besitzt und eventuell die stimulierende Wirkung auf die Epidermis vermittelt (LINCOLN und RICHARDSON, 1998).

Die Proliferation und Differenzierung von Epidermiszellen wird außerdem durch den epidermalen Wachstumsfaktor (epidermal growth factor, EGF) angeregt (COHEN u. ELLIOTT, 1963; HENDRY et al., 1999; RHEINWALD u. GREEN, 1977; WYNN et al., 1995). Dieses Hormon wird unter anderem in der Adenohypophyse gebildet, weshalb es bei Hypophysentumoren zu einer Erhöhung der EGF-Konzentration im Blut und infolgedessen zur Entwicklung einer hormonellen Hufrehe kommen kann (BUDRAS et al., 1999). Die Wirkung des EGF wird durch einen transmembranösen Rezeptor vermittelt (CARPENTER, 1987), der nach GROSENBAUGH et al. (1991) auch in der Hufepidermis vorkommt. An diesen EGF-Rezeptor kann außerdem der transforming growth factor-alpha (TGF- α) binden, wodurch dieser EGF-ähnliche Wachstumsfaktor ebenfalls stimulierend auf die Zellproliferation der Epidermis wirkt (COFFEY et al., 1987; WYNN et al., 1995). Neben einer lokalen Produktion in der Epidermis (DUCROS et al., 1992; FINZI et al., 1991), wird der TGF- α außerdem in den Prolaktinbildenden Zellen der Adenohypophyse synthetisiert und von dort ins Blut abgegeben (KOBRIK et al., 1987). Ähnlich wie das Prolaktin wird der TGF- α möglicherweise ebenfalls in Abhängigkeit von der Tageslichtlänge aus der Hypophyse freigesetzt, wodurch er vergleichbare Auswirkungen auf den Jahresrhythmus der Hornbildungsrate haben könnte. Eine derartige saisonale Wirkung der Wachstumsfaktoren ist bisher jedoch nicht bekannt.

Schließlich müssen auch alimentäre Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Von besonderer Bedeutung für die Hornbildung ist nach MEYER (1992) und TIMM (1993) der Rohprotein-gehalt, der im Grünfutter mit fortschreitendem Alter der Pflanzen abnimmt (MEYER, 1992) und somit im Winter minimal ist. Bei den untersuchten Przewalskipferden dürfte die marginale Eiweißversorgung zur Abnahme der Hufhornproduktion in dieser Jahreszeit beigetragen haben, denn die Tiere wurden ganzjährig auf der Weide gehalten, ohne dass eine Zufütterung erfolgte. Da TIMM (1993) jedoch auch bei einer gleichmäßigen Fütterung der Pferde eine Erniedrigung der Hornbildungsrate im Winter beobachtet, scheint der alimentäre Einfluss eher eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der bei den Przewalskipferden beobachtete Jahresrhythmus der Hufhornproduktion durch zahlreiche Faktoren bedingt ist. Eine besondere Bedeutung kommt den Veränderungen der Tageslichtlänge und der Umgebungstemperatur zu, wodurch unter anderem die dermale Durchblutungsrate und der Hormonhaushalt beeinflusst werden. Die saisonal unterschiedliche Bewegungsaktivität der Przewalskipferde sowie die in Abhängigkeit von der Jahreszeit variierende Nährstoffversorgung haben eine modulierende Wirkung, indem sie die jahreszeitlichen Schwankungen der Hornbildungsrate verstärken.

Neben der Untersuchung der Hornbildungsrate wurde auch der **monatliche Hornverlust** bestimmt. Dabei wurde nicht nur der Hornabrieb am Tragrand berücksichtigt, sondern auch Tragrandausbrüche, die insbesondere in den Monaten Mai bis August aufgetreten sind. Die Werte des monatlichen Hornverlustes liegen bei den untersuchten Przewalskipferden im Jahresmittel zwischen 3,27 - 7,13 mm / 28 Tage, wobei ein Durchschnittswert von $5,48 \pm 4,26$ mm / 28 Tage berechnet werden kann. Somit sind bei den untersuchten Przewalskipferden hinsichtlich des Hornverlustes größere individuelle Unterschiede zu verzeichnen als bei der Hornbildungsrate.

Zum Abnutzungsgrad des Hufhornes beim Hauspferd liegen in der Literatur nur wenige Angaben vor, die sich ausschließlich auf den reinen Hornabrieb beziehen. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, wurde auch für die untersuchten Przewalskipferde der durchschnittliche Hornabrieb bestimmt. Bei dieser Berechnung blieb der durch Tragrandausbrüche bedingte Hornverlust (> 15 mm / 28 Tage) unberücksichtigt. Der auf diese Weise ermittelte Jahresdurchschnitt des reinen Hornabriebes von $4,85 \pm 2,67$ mm / 28 Tage weicht kaum von dem Ergebnis von HERZBERG (1996) ab, der bei Shetlandponys eine Abnutzung des Hornes am Tragrand von durchschnittlich 5 mm / 28 Tage feststellt. Auch die Ergebnisse von RICHTER (1990), der bei Haflingern einen Hornabrieb von 4 - 6 mm / 28 Tage beobachtet, stimmen mit dem bei den Przewalskipferden gemessenen Hornabrieb überein. Demzufolge lassen sich auch hinsichtlich des Hornabriebes keine domestikationsbedingten Veränderungen feststellen.

Neben der genetischen Disposition, die für die individuellen Unterschiede des Hornverlustes verantwortlich ist, gibt es zahlreiche weitere Einflussfaktoren, von denen einige kurz diskutiert werden sollen. So beschreiben HAHN et al. (1986) bei Rindern an den Klauen der

Hintergliedmaßen eine höhere Hornabnutzung als an denen der Vordergliedmaßen. Ein derartiger *anatomisch bedingter Einfluss* lässt sich bei den untersuchten Przewalskipferden nicht nachweisen. Möglicherweise ist dieser Effekt tierartsspezifisch, da auch SCHREYER (1997) und HERZBERG (1996) bei den von ihnen untersuchten Pferden keine statistisch signifikanten Unterschiede des Hornabtriebes an den Vorder- und Hinterhufen beobachten können.

Nach CAMARA und GRAVERT (1971) wird die Hornabnutzung bei Rindern außerdem vom *Alter* der Tiere beeinflusst, wobei Jungtiere einen geringeren Klauenabrieb zeigen als ältere Rinder. Eine entsprechende altersbedingte Beeinflussung des Hornabtriebes lässt sich bei den untersuchten Przewalskipferden nicht feststellen.

Über den Einfluss des *Geschlechtes* auf den Hornabrieb ist bisher wenig bekannt. Auch bei den untersuchten Przewalskipferden ist eine aussagekräftige Beurteilung des geschlechtsspezifischen Einflusses nicht möglich, da für die Untersuchung lediglich ein Hengst zur Verfügung stand.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die **Jahreszeit**, denn ähnlich wie bei der Hornbildungsrate können bei den untersuchten Przewalskipferden auch hinsichtlich des Hornabtriebes deutliche jahreszeitliche Unterschiede festgestellt werden. So ist der durchschnittliche Hornabrieb im Winter ($3,83 \pm 2,01$ mm / 28 Tage) sowie im Herbst ($3,39 \pm 1,86$ mm / 28 Tage) wesentlich niedriger als im Sommer ($6,64 \pm 2,46$ mm / 28 Tage). Bei Berücksichtigung der Tragrandausbrüche, die ausschließlich im Frühjahr und Sommer zu beobachten waren, sind die jahreszeitlichen Schwankungen sogar noch stärker ausgeprägt, da der Gesamt-Hornverlust im Sommer mit durchschnittlich $8,43 \pm 5,91$ mm / 28 Tage höher ist als der reine Hornabrieb. Diese jahreszeitlich bedingten Unterschiede des Hornabtriebes sind nicht spezifisch für Przewalskipferde, denn bei einer Untersuchung an Haflingern stellt RICHTER (1990) im Sommer ebenfalls einen höheren Abrieb fest als in den Wintermonaten. Eine vergleichbare Jahresrhythmik der Hornabnutzung beschreiben HAHN et al. (1986) auch bei Rindern.

Die beobachteten jahreszeitlich bedingten Unterschiede müssen sicherlich im Zusammenhang mit mehreren Faktoren gesehen werden. Dabei sind nach HOOD et al. (1997) sowie ROONEY (1999) insbesondere das Körpergewicht der Pferde sowie die Bodenverhältnisse von Bedeutung. Bei den untersuchten Przewalskipferden scheint der Einfluss des Körpergewichtes auf den Hornabrieb allerdings nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Eine Gegenüberstellung des Jahresganges der beiden Merkmale lässt zwar Ähnlichkeiten erkennen, denn auch das durchschnittliche Körpergewicht der untersuchten Przewalskipferde ist im Sommer höher als im Winter, bei der Betrachtung der verschiedenen Individuen ist jedoch nur bei wenigen Pferden eine deutlich positive Korrelation zwischen dem Körpergewicht und dem Hornabrieb feststellbar. Vermutlich sind daher andere Faktoren wie zum Beispiel die Bodenbeschaffenheit für die Ausbildung des Jahresrhythmus bedeutender. So lassen sich die hohen Werte des Hornabtriebes im Januar und Februar des Jahres 1996 damit erklären, dass die im Semireservat Schorfheide-Liebenthal gemessene Durchschnittstemperatur unter dem

Gefrierpunkt lag (siehe Tabelle IV im Anhang). Der gefrorene Boden dürfte zu einem erhöhten Reibungswiderstand bei der Fußung und somit zu einem vermehrten Hornabrieb geführt haben. In den Jahren 1997 und 1998 war die durchschnittliche Lufttemperatur in den Wintermonaten höher und der Boden daher vermutlich bedeutend weicher als im Vorjahr. Das korreliert mit dem bei den Przewalskipferden ermittelten Hornabrieb, der in diesen Jahren im Winter vergleichsweise niedrig war. Der starke Hornabrieb im Sommer lässt sich ebenfalls durch die Witterungsverhältnisse erklären, denn nach ROONEY (1999) sinkt auch bei Trockenheit die Elastizität des Bodens. Infolgedessen wird der Reibungswiderstand bei der Fußung erhöht und der Hornabrieb nimmt zu. Ein feuchter Boden besitzt dagegen eine hohe Elastizität, wodurch der Hornabrieb reduziert wird (ROONEY, 1999). Der frische Pflanzenaufwuchs im Frühling und die zumeist feuchte Witterung im Herbst könnten somit eine Erklärung für die vergleichsweise niedrigen Abriebswerte sein, die in diesen Jahreszeiten bei den untersuchten Przewalskipferden beobachtet werden konnten.

Nach HERZBERG (1996) ist die Hornabnutzung außerdem von der Bewegungsaktivität der Pferde abhängig. Ein derartiger Einfluss ist sicherlich plausibel, lässt sich bei den untersuchten Przewalskipferden allerdings nicht nachweisen. Die Bewegungsaktivität der im Semireservat Schorfheide-Liebenthal gehaltenen Przewalskipferde ist zwar im Sommer ebenfalls deutlich höher als im Winter (BERGER et al., 1999; SCHEIBE et al., 1999), bei einem Vergleich des Jahresganges von Hornabrieb und körperlicher Bewegung der Pferde sind jedoch erhebliche Unterschiede festzustellen. Diese Ergebnisse sind zunächst etwas überraschend, bei genauer Betrachtung jedoch nicht weiter verwunderlich, da der bei den Przewalskipferden beobachtete Jahresrhythmus des Hornabriebes multifaktoriell beeinflusst wird. Durch das Zusammenwirken der verschiedenen Faktoren ist der Einfluss eines einzelnen Faktors unter Umständen nicht mehr deutlich abgrenzbar. Eine Beeinflussung des Hornabriebes durch die Bewegungsaktivität der Pferde ist somit auch bei den untersuchten Przewalskipferden nicht auszuschließen, vermutlich sind jedoch andere Faktoren wesentlich bedeutender für die Ausbildung der Jahresrhythmik.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die in Abhängigkeit von der Jahreszeit variierende Bodenbeschaffenheit von besonderer Bedeutung für das Entstehen der beobachteten saisonalen Unterschiede des Hufhornabriebes ist, während das Körpergewicht und die Bewegungsaktivität der Przewalskipferde lediglich eine sekundäre Rolle spielen.

Bei der Gegenüberstellung des Hornabriebes und der Hufhornproduktion ist bei den untersuchten Przewalskipferden eine positive Korrelation festzustellen. Beide Merkmale weisen im Sommer maximale Werte auf und sind im Winter durch relativ niedrige Werte gekennzeichnet. Die Ähnlichkeit des Jahresganges könnte zwar auch zufallsbedingt sein, wahrscheinlicher ist jedoch ein direkter Zusammenhang. Nach KNEZEVIC (1959) und ROONEY (1999) wirkt nämlich eine Hufkorrektur, die mit einem hohen Hornverlust vergleichbar ist, stimulierend auf die Hufhornproduktion. Dabei kann es nach THOMASON (1998) keinen direkten feedback-Mechanismus geben, da das Hufhorn aus totem Material besteht. Der

stimulierende Reiz muss vielmehr auf die lebende Epidermis am Kronrand wirken. THOMASON (1998) vermutet daher, dass die Hufkorrektur eine Änderung des Spannungszustandes in der Hornkapsel bedingt, wodurch die Proliferation der Hufepidermis angeregt wird. Bei den untersuchten Przewalskipferden könnte somit der hohe Hornverlust im Sommer für die vermehrte Hornbildung in dieser Jahreszeit mitverantwortlich sein. Möglich ist allerdings auch ein umgekehrter Zusammenhang. So könnte die hohe Hornbildungsrate in den Sommermonaten zur Bildung von qualitativ minderwertigem Horn führen, welches einem hohen Hornverlust unterliegt, wenn es nach etwa einem Jahr im darauffolgenden Sommer den Tragrand erreicht. Dieser Zusammenhang ist umso wahrscheinlicher, da auch hinsichtlich der Horneigenschaften jahreszeitlich bedingte Schwankungen festgestellt werden konnten. Auf diese Unterschiede wird später noch ausführlicher eingegangen. Zunächst sollen jedoch die innerhalb der Hufwand festgestellten Qualitätsunterschiede erörtert und den Gegebenheiten beim Hauspferd gegenübergestellt werden.

Bei der Beurteilung der **Hornqualität** müssen stets mehrere Faktoren berücksichtigt werden, da die Beschreibung einzelner Kriterien keine Schlussfolgerung auf die mechanisch-physikalischen Eigenschaften des Hufhornes zulässt (MÜLLING et al., 1994b). Von besonderer Bedeutung sind strukturelle Parameter, die nach PELLMANN et al. (1993) drei Kategorien zuzuordnen sind. Neben der Architektur des Hornzellverbandes bestimmen auch inter- und intrazelluläre Faktoren die Hornqualität. Da erst die Beurteilung möglichst vieler struktureller Faktoren in ihrer segmentspezifischen Kombination in Verbindung mit der mechanisch-physikalischen Materialprüfung eine zuverlässige Beurteilung der Hornqualität und eine Identifikation von Prädilektionsstellen für Erkrankungen ermöglicht (MÜLLING et al., 1994b), wurde das Horn der Przewalskipferde unter Berücksichtigung aller bekannten strukturellen Einflussfaktoren untersucht. Bei der Materialprüfung wurden solche Parameter bestimmt, die nach SPITZLEI (1996) als Kriterien für Qualitätsunterschiede angesehen werden können. Dazu gehören neben der Hornhärte auch der Wassergehalt, das Wasseraufnahmevermögen sowie die Wasserspeicherfähigkeit.

Die Hornqualität variiert in den einzelnen Segmenten des Pferdehufes entsprechend den unterschiedlichen mechanischen Anforderungen, die an das Horn bei der Fußung gestellt werden (FROHNES, 1999; PELLMANN et al., 1993). Darüber hinaus lassen sich jedoch auch innerhalb eines Segmentes unterschiedliche Horneigenschaften feststellen. Innerhalb des Kronsegmentes der untersuchten Przewalskipferde nimmt beispielsweise die Hornhärte bei senkrecht zur Röhrenachse durchgeführter Messung vom äußeren zum inneren Kronhorn um durchschnittlich 20,61 SHORE C-Einheiten ab. Dieser Härtegradient entspricht den natürlichen Gegebenheiten, da die Messung direkt nach der Probeentnahme und somit bei einem physiologischem Wassergehalt der Hornproben erfolgte. Da zwischen der Festigkeit und dem Feuchtigkeitsgehalt des Hornes eine negative Korrelation besteht, die bereits mehrfach beschrieben wurde (BERTRAM u. GOSLINE, 1987; DOUGLAS et al., 1996; KASAPI u. GOSLINE, 1997; NAUMANN et al., 1987; SPITZLEI, 1996) und durch die eigenen

Untersuchungen bestätigt werden konnte, lässt sich die abnehmende Hornhärte innerhalb der Schutzschicht unter anderem dadurch erklären, dass der physiologische Wassergehalt vom äußeren zum inneren Kronhorn um durchschnittlich 12,77 % zunimmt. Diese Beobachtungen treffen nicht nur für die untersuchten Przewalskipferde zu, da auch im Kronhorn von Hauspferden vergleichbare Gradienten hinsichtlich der Hornhärte (DIRKS, 1985; DOUGLAS, 1997) sowie des Wassergehaltes (DOUGLAS et al., 1996; KÜNG, 1991) beschrieben werden.

Die genannten Gradienten, die sich bis in das Wandhorn fortsetzen, haben eine große funktionelle Bedeutung. Während das äußere Kronhorn sehr widerstandsfähig sein muss, um dem gesamten Zehenendorgan einen optimalen Schutz gegenüber mechanischen Umwelteinflüssen bieten zu können, muss der innere Anteil der Hufplatte verhältnismäßig weich und verformbar sein, damit die Zugkraft des Hufbeinträgers federnd-elastisch aufgenommen und weitergeleitet werden kann. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Kraftübertragung innerhalb der Hufplatte ist es außerdem notwendig, dass das weiche Wandhorn allmählich in das harte äußere Kronhorn übergeht. Bei einem abrupten Übergang würden nämlich an der Grenzfläche hohe Spannungen entstehen (DOUGLAS et al., 1996; KASAPI u. GOSLINE, 1997), wodurch Rissbildungen innerhalb der Hufplatte vorprogrammiert wären.

Der innerhalb der Hufplatte festgestellte Feuchtigkeitsgradient ist nach BERTRAM und GOSLINE (1987) durch den Abstand zur Wandlerhaut bedingt. In der Nähe der Wandlerhaut ist der Wassergehalt des Hornes hoch, da fortwährend Flüssigkeit aus der vaskularisierten Lederhaut in die Epidermis diffundiert. Mit zunehmender Diffusionsstrecke nimmt der Wassergehalt des Hornes innerhalb der Hufplatte ab (BERTRAM u. GOSLINE, 1987; KÜNG, 1991). Darüber hinaus müssen jedoch auch strukturelle Eigenschaften des Hornes eine Rolle spielen, denn der maximale Wassergehalt und somit das Wasseraufnahmevermögen nehmen bei den untersuchten Przewalskipferden ebenfalls vom Wandhorn zum äußeren Kronhorn kontinuierlich ab. Außerdem nimmt das äußere Kronhorn Wasser deutlich langsamer auf als das innere Kronhorn und das Wandhorn. Auch bei Hauspferden können vergleichbare Gradienten hinsichtlich der Wasseraufnahmekapazität (KASAPI u. GOSLINE, 1997) sowie der Aufnahmegeschwindigkeit des Wassers (KASAPI u. GOSLINE, 1998) festgestellt werden. Innerhalb der Hufplatte variieren bei den untersuchten Przewalskipferden außerdem das Ausmaß und die Geschwindigkeit der Wasserabgabe während einer Trocknung der Hornproben bei Raumtemperatur. So wird das Wasser vom äußeren Kronhorn relativ lange gespeichert, während das innere Kronhorn und insbesondere das Horn der weißen Linie einen Großteil der aufgenommenen Feuchtigkeit sehr schnell wieder abgeben. Unter natürlichen Gegebenheiten ist der Wasserverlust jedoch durch die Eigenschaften des äußeren Kronhorns begrenzt, da nur dieser Anteil der Hufplatte den Umweltbedingungen in größerem Ausmaß ausgesetzt ist. Dadurch wird eine gewisse Wasserspeicherung innerhalb der Hufkapsel erreicht. In diesem Zusammenhang soll kurz erwähnt werden, dass das Saumhorn, dem ebenfalls eine wasserspeichernde Funktion zugesprochen wird (KASAPI u. GOSLINE, 1997 u. 1998), bei den untersuchten Przewalskipferden lediglich in der Nähe des Kronrandes

am Aufbau der Hufplatte beteiligt ist. Der Großteil der Hufplatte setzt sich demzufolge nur aus Kron- und Wandhorn zusammen, weshalb dem äußeren Kronhorn als Barriere zum Schutz vor übermäßigen Wasserverlusten eine besondere Bedeutung zukommt.

Die innerhalb der Schutzschicht festgestellten Unterschiede der mechanisch-physikalischen Horneigenschaften dürften mit der Struktur des Hornes zusammenhängen. Eine besondere Bedeutung kommt nach Meinung verschiedener Autoren der Architektur des Hornzellverbandes zu. So soll das Wasseraufnahmevermögen des Hornes umso höher sein, je mehr Zwischenröhrchenhorn vorhanden ist (DIETZ u. PRIETZ, 1981; VERMUNT u. GREENOUGH, 1995) bzw. je größer der Markanteil der Hornröhrchen ist (DIETZ et al., 1971; WALZ, 1980). Auch eine schnelle Wasserabgabe wird nach TSCHERNE (1910) durch einen hohen Anteil an Zwischenröhrchenhorn und einen großen Markdurchmesser begünstigt. Darüber hinaus soll die Hornhärte positiv mit dem Durchmesser der Hornröhrchen (PELLMANN et al., 1993) und der Dicke der Röhrchenrinde (RÖSSNER, 1940; TSCHERNE, 1910) korreliert sein. Dieser Zusammenhang zwischen den mechanisch-physikalischen Horneigenschaften und den Röhrchenparametern kann jedoch kein allgemeingültiges Prinzip sein, da das innere Kronhorn der untersuchten Przewalskipferde eine geringere Härte und einen höheren Wassergehalt aufweist als das äußere Kronhorn, obwohl die inneren Kronhornröhrchen einen größeren Durchmesser sowie einen kleinen Markraum besitzen und auch der Anteil des Zwischenröhrchenhornes geringer ist als im äußeren Kronhorn.

Für die Ausbildung der innerhalb der Schutzschicht festgestellten Gradienten des Wassergehaltes und der Hornhärte spielt die Hornarchitektur demzufolge nur eine untergeordnete Rolle. Diese Auffassung wird von KASAPI und GOSLINE (1997 u. 1998) geteilt, die der Hornarchitektur im Kronhorn vielmehr eine Funktion als mechanische Barriere gegen die Ausbreitung von Hornspalten zuschreiben. Der unterschiedliche Bau der verschiedenen Kronhornzonen ist vielmehr für eine Umorientierung von Hornrissen verantwortlich, wodurch die empfindliche Lederhaut vor Verletzungen geschützt wird (BERTRAM u. GOSLINE, 1986; KASAPI u. GOSLINE, 1997 u. 1998). Der Nachteil dieser Architekturunterschiede besteht darin, dass der Grenzbereich von Zonen mit unterschiedlichen Eigenschaften (insbesondere der Übergang zwischen der mittleren und der inneren Kronhornzone) eine Prädilektionsstelle für die Entstehung von Zerreißen im Horngefüge darstellt (BOLLIGER, 1991; KÜNG, 1991; ZENKER et al., 1995). Derartige Zusammenhangstrennungen innerhalb der Schutzschicht werden im klinischen Sprachgebrauch als "hohle Wand" bezeichnet (RUTHE et al., 1997).

Da sich die innerhalb der Schutzschicht festgestellten Unterschiede der mechanisch-physikalischen Materialeigenschaften nicht durch die Hornarchitektur erklären lassen, müssen andere Strukturparameter dafür verantwortlich sein. Insbesondere für die unterschiedliche Wasseraufnahmefähigkeit des Hornes spielen nach KEMPSON und CAMPBELL (1998) unter anderem interzelluläre Faktoren eine Rolle. Mittels einer wasserlöslichen Tracer-Substanz lässt sich nämlich eine interzelluläre Permeabilitätsbarriere für Wasser feststellen, die innerhalb der Schutzschicht variiert. Während der Tracer im äußeren Kronhorn nur an der

Probenoberfläche in den Interzellularspalt eindringt, kann im inneren Kronhorn ein verhältnismäßig tiefes Eindringen beobachtet werden, wobei der Tracer außerdem auch intrazellulär aufgenommen wird (KEMPSON u. CAMPBELL, 1998). Die Unterschiede der interzellulären Wasserbarriere führen die Autoren auf eine abweichende Zusammensetzung des Interzellularkittes zurück.

Daneben werden die Horneigenschaften maßgeblich von intrazellulären Faktoren beeinflusst, wobei den Strukturproteinen der verhornten Epidermiszellen eine besondere Bedeutung zukommt. Die Proteinzusammensetzung und die Anordnung der verschiedenen Proteine zueinander bestimmen die Architektur der Hornzellen (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995) und bedingen wahrscheinlich auch die Wasserbindungsfähigkeit des Hornes. KASAPI und GOSLINE (1997 u. 1999) vermuten, dass die innerhalb der Hufplatte festgestellten Unterschiede der intrazellulären Wasseraufnahme insbesondere mit dem Verhältnis von *Keratinproteinen* und *Intermediärfilament-assoziierten Proteinen* (IFAP) zusammenhängen. Dabei scheinen die Letzteren eine besondere Rolle zu spielen, da das innere Kronhorn der untersuchten Przewalskipferde, das eine hohe Wasseraufnahmekapazität besitzt, durch eine große Anzahl spongiöser Räume gekennzeichnet ist, die sich zwischen den Keratinfilamentbündeln und somit im Bereich der IFAP befinden. Ähnliche flüssigkeitsgefüllte Räume werden auch im Wandhorn des Pferdehufes (BUDRAS u. HUSKAMP, 1995; BUDRAS et al., 1989) sowie im Ballenhorn der Rinderklaue (MÜLLING et al., 1994b) beschrieben. Im harten äußeren Kronhorn der untersuchten Przewalskipferde, das nur ein geringes Wasseraufnahmevermögen aufweist, herrscht dagegen eine solide Zytoarchitektur vor, die offensichtlich durch eine andere Proteinzusammensetzung bedingt ist.

In diesem Zusammenhang lassen sich auch die qualitativen Unterschiede des Bandenmusters erklären, die innerhalb des Kronsegmentes mittels der gelelektrophoretischen Untersuchung sowohl bei Przewalski- als auch bei Warmblutpferden festgestellt werden konnten. Derartige Unterschiede der Proteinzusammensetzung innerhalb der Schutzschicht wurden zwar vermutet (KASAPI u. GOSLINE, 1999), bestätigende Untersuchungen fehlten jedoch bislang.

Die im Gewichtsbereich zwischen 10 und 30 kDa festgestellten Unterschiede im Bandenmuster könnten als Hinweis dafür gedeutet werden, dass die Proteinzusammensetzung hinsichtlich der IFAP innerhalb der Schutzschicht variiert. Da die IFAP im Kronhorn des Pferdehufes ein Molekulargewicht zwischen 10 und 20 kDa ("high tyrosin"-Proteine) bzw. zwischen 10 und 30 kDa ("high sulfur"-Proteine) aufweisen (GROSENBAUGH u. HOOD, 1992), dürfte ein Großteil der dargestellten niedermolekularen Banden durch diese Proteine bedingt sein. Einige der Proteinbanden könnten allerdings auch durch andere Strukturproteine (z.B. Proteine des cornified cell envelope) oder durch Proteine aus dem Interzellularkitt, aus Desmosomen sowie aus Organellenresten hervorgerufen werden, die im inneren Kronhorn eventuell ebenfalls ein unterschiedliches Profil aufweisen.

Besonders auffällig sind die Unterschiede des Proteinbandenmusters im höhermolekularen Gewichtsbereich, wobei im inneren Kronhorn insbesondere die Proteine mit Molekular-

gewichten zwischen 59 und 80,5 kDa mengenmäßig reduziert sind. Mittels Antikörper, die gegen Zytokeratine gerichtet sind, konnten allerdings nur einige Banden eindeutig als Keratinproteine identifiziert werden. Die übrigen Proteinbanden könnten auch durch andere Strukturproteine bedingt sein. Dazu gehören beispielsweise die Lamine, die nach STEINERT und ROOP (1988) ein Molekulargewicht zwischen 60 und 75 kDa besitzen und zur Stabilität des Zellkernes beitragen. Daneben besteht die Möglichkeit, dass es sich um Keratinproteine handelt, die mit den angewandten Antizytokeratinen nicht reagieren. So beschreiben MEYER et al. (1998) ein etwa 68 kDa schwere Zytokeratin vom Typ I (Ck 9), das sich mit dem polyvalenten Antikörper AE1/AE3 nicht darstellen lässt. Die bei der eigenen Untersuchung festgestellte Proteinbande mit einem Molekulargewicht von 68 kDa, die sich im inneren Kronhorn kaum darstellen lässt, entspricht daher wahrscheinlich ebenfalls dem Zytokeratin Ck 9. Dieses Protein ist nach MEYER et al. (1998) eine Hauptkomponente von Hornzellen, die im Modus der harten Verhornung gebildet werden, und steht vermutlich in einem funktionellen Zusammenhang mit den mechanischen Eigenschaften des Hornes. Bei der eigenen Untersuchung lässt sich das 68 kDa-Protein jedoch sowohl im sehr harten äußeren Kronhorn als auch im relativ weichen Horn der weißen Linie als deutliche Bande darstellen. Es ist daher eher unwahrscheinlich, dass der niedrige Gehalt dieses Proteins im inneren Kronhorn mit der erhöhten Wasseraufnahme bzw. der geringen Hornhärte zusammenhängt. Auch die Aussage von FROHNES (1999), dass eine ähnliche Hornkonsistenz durch ein analoges Zytokeratinmuster bedingt wird, kann somit nicht bestätigt werden.

Die unterschiedliche Proteinzusammensetzung des inneren Kronhornes könnte allerdings dazu führen, dass andere Bindungstypen zwischen den Typ I- und Typ II-Keratinen bzw. zwischen den Zytokeratinen und anderen Strukturproteinen ausgebildet werden. Eine besondere Bedeutung kommt nach Meinung verschiedener Autoren (BERTRAM u. GOSLINE, 1986; GIROUD u. LEBLOND, 1951; GROSENBAUGH u. HOOD, 1992; PELLMANN et al., 1993; STEINERT et al., 1984) den *Disulfidbindungen* (SS-Brücken) zu, da diese kovalenten Bindungen für die hohe mechanische Widerstandsfähigkeit des Hornes verantwortlich sein sollen. Ihre Bildung ist abhängig vom Vorhandensein der schwefelhaltigen Aminosäure Cystein, die sowohl in den Keratinproteinen als auch in den IFAP vom "high sulfur"-Typ (HS-Proteine) sowie in einigen Proteinen des cornified cell envelope in großem Umfang enthalten ist (HOHL et al., 1991; STEINERT et al., 1984). Bei den untersuchten Przewalskipferden ist der Gehalt an SS-Gruppen im weichen inneren Kronhorn zwar verhältnismäßig niedrig, in den übrigen Kronhornzonen korreliert die Hornhärte jedoch nicht mit der Anzahl der nachweisbaren SS-Brücken. So lassen sich die meisten SS-Bindungen im mittleren Kronhorn nachweisen, obwohl das äußere Kronhorn wesentlich härter ist. Die eigene Untersuchung bestätigt somit die Auffassung von FROHNES (1999) und KORTE (1987), die ebenfalls keinen direkten Zusammenhang zwischen der Hornhärte und der Stärke der SS-Gruppen-Nachweisreaktion feststellen konnten.

Es ist zwar nicht auszuschließen, dass die angewandte DDD-Reaktion nicht alle vorhandenen SS-Gruppen erfasst, wahrscheinlicher ist jedoch, dass die intrazelluläre Festigkeit außerdem von anderen Bindungstypen moduliert wird. Bedeutsam für die mechanischen Eigenschaften dürften insbesondere die nicht-kovalenten *Wasserstoffbindungen* (H-Brücken) sein, die nach BERTRAM und GOSLINE (1987) vor allem von den IFAP des "high tyrosin"-Typs (HT-Proteine) ausgebildet werden. Da auch Wassermoleküle derartige Bindungen mit den Proteinen eingehen und dadurch die Bindungsstellen besetzen können, nimmt die Anzahl der H-Brücken zwischen den Proteinen und somit die intrazelluläre Stabilität mit zunehmendem Wassergehalt des Hornes ab. Aufgrund der Fähigkeit, H-Brücken in großem Umfang auszubilden, spielen die HT-Proteine auch eine bedeutende Rolle für das Wasseraufnahmevermögen des Hornes. Die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Kronhornzonen könnten demzufolge durch ein unterschiedliches Verhältnis von HT- zu HS-Proteinen bedingt sein. Dabei dürften die IFAP im inneren Kronhorn, das eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit besitzt, vorwiegend zu den HT-Proteinen gehören, während in den übrigen Kronhornzonen ein höherer Anteil an HS-Proteinen vorkommt.

Die Proteinzusammensetzung beeinflusst nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern wahrscheinlich auch das Färbeverhalten des Hornes. Die Färbung mit Rhodamin-B, die nach LIISBERG (1968) spezifisch für Keratinproteine ist, fällt beispielsweise lediglich im äußeren und mittleren Kronhorn deutlich positiv aus. Im inneren Kronhorn nimmt die Reaktionsintensität in Richtung Wandsegment zunehmend ab, obwohl sich Zytokeratine auch in dieser Zone mittels Antikörper nachweisen lassen. In den lebenden Epidermiszellen, die nach SUN und GREEN (1978) bereits eine ausgeprägte Keratinsynthese aufweisen, ist die Reaktion ebenfalls negativ. Möglicherweise ist daher die Färbereaktion an das Vorhandensein bestimmter Keratinproteine gekoppelt, die in der lebenden Epidermis sowie im inneren Kronhorn fehlen bzw. nur in geringer Menge gebildet werden. Daneben ist es auch möglich, dass im inneren Kronhorn eine "Maskierung" der Keratinproteine durch die IFAP (vergleichbar mit der Kollagen-Maskierung im hyalinen Knorpel) erfolgt.

Die im Kronhorn auftretenden innersegmentalen Unterschiede der Hornqualität wurden so ausführlich diskutiert, weil daraus deutlich wird, dass ein Vergleich des Kronhornes von Haus- und Wildequiden nur bei einer Probeentnahme aus den sich entsprechenden Lokalisationen innerhalb der Schutzschicht sinnvoll ist. Die meisten Autoren, die sich mit den Horneigenschaften des Kronhornes beim Hauspferd beschäftigt haben, geben allerdings keine präzisen Angaben zu den Probeentnahmestellen an. Aus diesem Grund kommt der Untersuchung von KÖNIG (in Vorb.) eine besondere Bedeutung zu, da zur Entnahme des Kronhornes von Warmblutpferden die gleichen Lokalisationen gewählt wurden wie bei der eigenen Untersuchung. Zur Vermeidung methodisch bedingter Unterschiede wurden außerdem die gleichen Untersuchungsmethoden angewandt. Um etwaige domestikationsbedingte Veränderungen hinsichtlich der Hornqualität darzustellen, sollen die eigenen Ergebnisse daher vornehmlich mit den Angaben von KÖNIG (in Vorb.) verglichen werden.

Eine Gegenüberstellung der Hornhärte ist schon deshalb interessant, weil dem Przewalskipferd ein im Vergleich zum Hauspferd äußerst hartes und widerstandsfähiges Hufhorn nachgesagt wird (VOLF, 1996; KIND, 1961). Ein Beweis für die Richtigkeit dieser Aussage wurde bisher jedoch nicht erbracht. Die bei einem physiologischen Wassergehalt der Hornproben und bei einer senkrecht zur Längsachse der Hornröhrchen gerichteten Druckkraft gemessene Hornhärte beträgt bei den untersuchten Przewalskipferden im äußeren Kronhorn 92,33 - 100 SHORE C-Einheiten, im mittleren Kronhorn 82,00 - 90,00 SHORE C-Einheiten und im inneren Kronhorn 65,67 - 82,33 SHORE C-Einheiten. An den entsprechenden Lokalisationen stellt KÖNIG (in Vorb.) bei Warmblutpferden Härtewerte von 87,7 - 96,7 SHORE C-Einheiten (äußeres Kronhorn), 75,3 - 92,3 SHORE C-Einheiten (mittleres Kronhorn) bzw. 65,3 - 90,7 SHORE C-Einheiten (inneres Kronhorn) fest. Somit ist die Hornhärte der untersuchten Przewalskipferde lediglich im äußeren Kronhorn höher als bei den Warmblutpferden, während sie in den übrigen Kronhornzonen im Schwankungsbereich der für Warmblutpferde ermittelten Werte liegt. Die pauschale Aussage, dass Przewalskipferde ein härteres Hufhorn besitzen als Hauspferde, muss dahingehend präzisiert werden, dass dies lediglich für das äußere Kronhorn zutrifft.

Auch bei einem Vergleich der Hornfeuchte lassen sich keine deutlichen Unterschiede zwischen Haus- und Przewalskipferden feststellen. Der durchschnittliche physiologische Wassergehalt beträgt bei den untersuchten Przewalskipferden im äußeren Kronhorn $20,25 \pm 0,50$ %, im mittleren Kronhorn $23,12 \pm 1,54$ % und im inneren Kronhorn $33,02 \pm 3,36$ %. Für die verschiedenen Kronhornzonen ermittelt KÖNIG (in Vorb.) bei Warmblutpferden Werte von 18,4 - 26,5 % (äußeres Kronhorn), 23,5 - 28,7 % (mittleres Kronhorn) bzw. 29,1 - 30,5 % (inneres Kronhorn). In der übrigen Literatur schwanken die Angaben zum Wassergehalt im äußeren Kronhorn zwischen 18 % (KÜNG, 1991) und $27,9 \pm 1,7$ % (DOUGLAS et al., 1996) und im inneren Kronhorn zwischen 26 % (KÜNG, 1991) und $35,5 \pm 2,5$ % (DOUGLAS et al., 1996). Der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt im Kronhorn der untersuchten Przewalskipferde liegt somit innerhalb der Variationsbreite der in der Literatur für Hauspferde angegebenen Werte.

Das Wasseraufnahmevermögen im Hufhorn der Przewalskipferde ist jedoch niedriger als das der Hauspferde. So steigt der durchschnittliche maximale Wassergehalt bei den untersuchten Przewalskipferden von $29,72 \pm 0,85$ % im äußeren Kronhorn, über $35,12 \pm 2,01$ % im mittleren Kronhorn auf $40,96 \pm 1,45$ % im inneren Kronhorn an. Nach KASAPI und GOSLINE (1997) beträgt der maximale Wassergehalt im äußeren Kronhorn von Hauspferden dagegen 35 %, im mittleren Kronhorn 41 % und im inneren Kronhorn 48 %. Es ist daher davon auszugehen, dass das Hufhorn von Hauspferden bei nasser Witterung mehr Wasser aufnimmt und somit weicher wird als das Hufhorn von Przewalskipferden.

Auch bei der Gegenüberstellung der histometrisch erfassbaren Hornarchitektur sind Unterschiede zwischen Haus- und Przewalskipferden erkennbar. Im äußeren Kronhorn der untersuchten Przewalskipferde lassen sich ovale Hornröhrchen mit einer Querschnittsfläche

von $4.622,17 - 16.081,64 \mu\text{m}^2$ feststellen. Der durchschnittliche Längsdurchmesser beträgt $147,53 \pm 19,99 \mu\text{m}$. Die ebenfalls ovalen mittleren Kronhornröhrchen besitzen eine Röhrchenfläche von $12.044,36 - 24.965,49 \mu\text{m}^2$, wobei der Längsdurchmesser einen Durchschnittswert von $165,52 \pm 20,40 \mu\text{m}$ aufweist. Im inneren Kronhorn beträgt die Querschnittsfläche der rundlichen Hornröhrchen $27.152,74 - 47.012,56 \mu\text{m}^2$, der Röhrchendurchmesser ist durchschnittlich $238,16 \pm 22,26 \mu\text{m}$ groß. Die Ergebnisse stimmen annähernd mit den Werten von KIND (1961) überein, der im Kronhorn von Przewalskipferden Hornröhrchen mit einem mittleren Durchmesser von $150 \mu\text{m}$ (äußeres Kronhorn), $205 \mu\text{m}$ (mittleres Kronhorn) bzw. $213 \mu\text{m}$ (inneres Kronhorn) beschreibt. Die Abweichungen sind sicherlich darauf zurückzuführen, dass nicht exakt die gleichen Lokalisationen innerhalb der Hufplatte untersucht wurden. Bei den eigenen Untersuchungen zur Hornarchitektur von Warmblutpferden konnten insbesondere im inneren Kronhorn größere Hornröhrchen festgestellt werden. Die Untersuchungen von KÖNIG (in Vorb.) zeigen jedoch, dass die Hornröhrchen der Hauspferde in allen drei Kronhornzonen größer sind als bei den untersuchten Przewalskipferden. So lässt sich für die einzelnen Warmblutpferde eine Röhrchenfläche von $10.178,9 - 30.684,5 \mu\text{m}^2$ (äußeres Kronhorn), $17.123,9 - 42.421,2 \mu\text{m}^2$ (mittleres Kronhorn) bzw. $49.877,1 - 107.100,1 \mu\text{m}^2$ (inneres Kronhorn) ermitteln (KÖNIG, in Vorb.). Dabei ist bei den Warmblutpferden insbesondere der Rindenanteil vergrößert, denn auch das Verhältnis von Röhrchenrinde zu Röhrchenmark ist höher als bei den Wildpferden. Während das Rinden/Mark-Verhältnis bei den untersuchten Przewalskipferden im äußeren Kronhorn annähernd $5 : 1$, im mittleren Kronhorn fast $10 : 1$ und im inneren Kronhorn etwa $30 : 1$ beträgt, lässt sich bei Warmblutpferden nach KÖNIG (in Vorb.) ein Verhältnis von etwa $10 : 1$ im äußeren Kronhorn, ca. $15 : 1$ im mittleren Kronhorn bzw. fast $42 : 1$ im inneren Kronhorn berechnen. Da nach PELLMANN et al. (1993) in Übereinstimmung mit RÖSSNER (1940) und TSCHERNE (1910) ein positiver Zusammenhang zwischen der Hornröhrchengröße bzw. der Dicke der Röhrchenrinde und der Festigkeit des Hufhornes besteht, müsste das Kronhorn der Warmblutpferde wesentlich härter sein als das der Przewalskipferde. Ein gegenteiliger Effekt könnte jedoch durch die Dichte der Hornröhrchen erreicht werden. So lassen sich bei den untersuchten Przewalskipferden im äußeren Kronhorn durchschnittlich etwa 39 Hornröhrchen / mm^2 , im mittleren Kronhorn ca. 21 Hornröhrchen / mm^2 und im inneren Kronhorn annähernd 15 Hornröhrchen / mm^2 feststellen. Bei den Warmblutpferden beschreibt KÖNIG (in Vorb.) im äußeren Kronhorn lediglich eine Röhrchendichte von etwa 19 Hornröhrchen / mm^2 , im mittleren Kronhorn finden sich ungefähr 11 Hornröhrchen / mm^2 und im inneren Kronhorn sind etwa 7 Hornröhrchen / mm^2 vorhanden. Nach DIETZ und PRIETZ (1981) ist das Horn aber umso stabiler, je mehr Hornröhrchen pro Flächeneinheit ausgebildet sind. Da sich zwischen den untersuchten Przewalskipferden und den Warmblutpferden letztendlich lediglich im äußeren Kronhorn Härteunterschiede nachweisen lassen, heben sich die beiden Effekte im mittleren und inneren Kronhorn vermutlich gegenseitig auf.

Bei der licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchung der inter- und intrazellulären Faktoren kommt KÖNIG (in Vorb.) zu ähnlichen Ergebnissen wie sie auch beim Przewalskipferd festgestellt werden konnten. Auf die einzelnen Befunde, die sich bei Haus- und Przewalskipferden entsprechen, soll nicht näher eingegangen werden. Bemerkenswert ist lediglich der Unterschied hinsichtlich des Erhaltes der Zellkerne bzw. deren Reste. Dieses elektronenmikroskopisch erfassbare Phänomen konnte bei den Przewalskipferden insbesondere im äußeren Kronhorn häufig beobachtet werden. Bei Hauspferden sind die vollständig verhornten Zellen nach POLLITT (1999) dagegen kernlos. Auch KÖNIG (in Vorb.) kann Kernreste nur vereinzelt nachweisen. In der Regel gelten Zellkerne, die in Hornzellen erhalten geblieben sind, als Zeichen für eine mangelhafte Ausreifung der verhornten Zellschichten (Parakeratose), wie sie beispielsweise bei Zinkmangel auftritt (REZAIAN et al., 1994). Bei den Przewalskipferden sind die Zellkerne bzw. deren Reste jedoch kein Kennzeichen für eine Verhornungsstörung, denn das Horn dieser Tiere ist qualitativ nicht minderwertiger als das Horn von Hauspferden. Die Aussage von BRAGULLA und MÜLLING (1997), dass Reste des Zellkernes die Filamentarchitektur stören und dadurch die Stabilität der Hornzelle verringern, kann somit nicht bestätigt werden.

Ein Vergleich zwischen den gelelektrophoretisch ermittelten Proteinbanden im Horn von Przewalskipferden und den Literaturangaben zum Hauspferd ist nur bedingt sinnvoll, da in Abhängigkeit von der Extraktionsmethode ein unterschiedliches Bandenmuster entsteht (BOWDEN et al., 1984; WATTLE, 1998). Um eine Gegenüberstellung trotzdem zu ermöglichen, wurden zusammen mit den Proben der Przewalskipferde auch Hornproben von einigen Warmblutpferden untersucht, wobei ein ähnliches Proteinbandenmuster festgestellt werden konnte. Geringe Unterschiede bestehen lediglich hinsichtlich der Färbeintensität einiger Proteinbanden. Diese Beobachtung wird durch die Ergebnisse von KÖNIG (in Vorb.) bestätigt, die für die Untersuchung des Kronhornes von Warmblutpferden die gleiche Extraktionsmethode sowie entsprechende Elektrophoresebedingungen gewählt hat. Die Ähnlichkeit des Proteinbandenmusters verdeutlicht, dass sich die Proteine im Hufhorn (z.B. Zytokeratine, IFAP, Proteine des cornified cell envelope) im Zuge der Domestikation kaum verändert haben. Hinsichtlich der Zytokeratine ist dieses Ergebnis nicht weiter erstaunlich, da die Keratinfilamente generell als phylogenetisch konservative Strukturen gelten, die bei unterschiedlichen Spezies einen vergleichbaren Aufbau sowie ähnliche biochemische und immunologische Eigenschaften besitzen (COOPER u. SUN, 1986; WATTLE, 1998).

Insgesamt sind bei der Gegenüberstellung der Hornqualität von Haus- und Wildpferden geringe Abweichungen hinsichtlich der mechanisch-physikalischen Horneigenschaften und der Hornstruktur erkennbar. So ist das Kronhorn der untersuchten Przewalskipferde durch ein geringeres Wasseraufnahmevermögen gekennzeichnet, das äußere Kronhorn der Przewalskipferde weist außerdem eine höhere Härte auf. Beim Vergleich der Hornarchitektur fällt auf, dass die Hornröhrchen im Kronhorn der Przewalskipferde kleiner sind, dichter beieinander stehen und ein geringeres Rinden/Mark-Verhältnis aufweisen. Geringgradige Unterschiede

lassen sich auch hinsichtlich einiger intrazellulärer Faktoren mit Einfluss auf die Hornqualität feststellen. Es muss jedoch kritisch angemerkt werden, dass lediglich das Hufhorn von Warmblutpferden mit dem der Przewalskipferde verglichen wurde. Aufgrund der großen genetischen Variabilität innerhalb der Hauspferde-Population ist es durchaus denkbar, dass sich bei der Untersuchung anderer Hauspferde-Typen (z.B. Ponys oder Kaltblüter) wesentlich geringere Unterschiede feststellen lassen.

Ähnlich wie die Hornbildungsrate und der Hornabrieb unterliegt die Hornqualität zahlreichen endo- und exogenen Einflussfaktoren. Eine Beeinflussung der Hornqualität durch das *Alter* oder das *Geschlecht* der Pferde ist umstritten. In Übereinstimmung mit BUTLER und HINTZ (1977) sowie SASSEN (1938) und SPITZLEI (1996), die bei den von ihnen untersuchten Hauspferden keine geschlechts- bzw. altersspezifischen Besonderheiten nachweisen können, ist auch bei den untersuchten Przewalskipferden ein derartiger Einfluss nicht erkennbar.

Ein weiterer Faktor mit einem gewissen Einfluss auf die Hornqualität ist der Abstand der Hornproben zur Kronlederhaut und somit das *Alter des Hornes*. Neben den mechanisch-physikalischen Eigenschaften, die sich insbesondere im proximalen Drittel der Schutzschicht ändern, lassen sich bei den untersuchten Przewalskipferden auch geringe strukturelle Unterschiede feststellen. So nimmt der Anteil der SS-Gruppen in proximodistaler Richtung zu, während der Gehalt an SH-Gruppen abnimmt. Mit zunehmender Hornalterung sind außerdem weniger Organellenreste in den Hornzellen darstellbar. Insbesondere im kronrandnahen Bereich nimmt auch die Hornfeuchte in proximodistaler Richtung ab. Dieser vertikale Feuchtigkeitsgradient, der auch bei Hauspferden beschrieben wird (BERTRAM u. GOSLINE, 1987; BUTLER u. HINTZ, 1977), ist ähnlich wie der bereits beschriebene horizontale Gradient vorwiegend auf die Entfernung zur vaskularisierten Lederhaut zurückzuführen. Der hohe Wassergehalt im kronrandnahen Horn, der durch die kurze Diffusionstrecke bedingt ist, trägt maßgeblich dazu bei, dass dieses Horn verhältnismäßig weich und flexibel ist. Dadurch kann der Zug des Hufbeinträgers die kaudoventrale Verlagerung der Hufplatte auslösen, die nach DOUGLAS et al. (1998) sowie HINTERHOFER et al. (1999) typisch für den Hufmechanismus ist. In den distalen zwei Dritteln besitzt der äußere Anteil der Hufplatte dagegen eine hohe Festigkeit, wodurch eine starke Verformung der Hornkapsel verhindert wird.

Auch die **Jahreszeit** übt einen Einfluss auf die Horneigenschaften aus. Bei Hauspferden beobachtet SPITZLEI (1996) in Übereinstimmung mit KÜNG (1991) und LEU (1987) eine Verschlechterung des Hufzustandes im Frühling und insbesondere in den Sommermonaten, während in den Herbst- und Wintermonaten eine Verbesserung der Hornqualität zu verzeichnen ist. Die Beurteilung der Hornqualität haben die genannten Autoren ausschließlich anhand des makroskopischen Erscheinungsbildes des gesamten Hufes vorgenommen, wobei der Zeitpunkt der Hornbildung nicht berücksichtigt wurde. Eine systematische Untersuchung zur Ermittlung von jahreszeitlich bedingten Unterschieden der mechanisch-physikalischen

Horneigenschaften bzw. der Hornstruktur wurde bislang nicht durchgeführt, weshalb den eigenen Untersuchungen eine besondere Bedeutung zukommt.

Es konnte nämlich festgestellt werden, dass auch diese Materialeigenschaften des Hufhornes bei den untersuchten Przewalskipferden in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Hornbildung variieren. So ist die Hornhärte im "Winterhorn" durch höhere Werte gekennzeichnet als im "Sommerhorn". Der durchschnittliche Härteunterschied beträgt bei physiologischem Wassergehalt des Hornes 3,46 SHORE C-Einheiten bzw. bei maximalem Wassergehalt 1,72 SHORE C-Einheiten. Hinsichtlich der Feuchtigkeitsparameter lassen sich allerdings keine jahreszeitlich bedingten Unterschiede feststellen.

Bei der Untersuchung der Hornarchitektur wurden jeweils die in unterschiedlichen Jahreszeiten gebildeten Abschnitte derselben Hornröhrchen gegenübergestellt. Während das "Winterhorn" der untersuchten Hufe durch vergleichsweise kleine Röhrchen gekennzeichnet ist, weisen die Hornröhrchen im "Sommerhorn" einen relativ großen Durchmesser auf. Dabei sind sowohl der Rindenanteil als auch das Röhrchenmark vergrößert. Das Verhältnis von Röhrchenrinde zu Röhrchenmark zeigt im Laufe des Sommers eine abnehmende Tendenz. Außerdem ist die Anzahl der Hornröhrchen pro Flächeneinheit im "Sommerhorn" niedriger als im "Winterhorn". Diese in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Hornbildung auftretenden Veränderungen der Hornarchitektur könnten eine Erklärung für die unterschiedliche Hornhärte sein, da eine hohe Festigkeit und Formstabilität des Hornes unter anderem durch eine hohe Röhrchendichte (DIETZ u. PRIETZ, 1981) sowie durch einen kleinen Markdurchmesser und eine breite Röhrchenrinde bedingt sein soll (RÖSSNER, 1940; TSCHERNE, 1910).

Auch die interzellulären Faktoren zeigen jahreszeitlich bedingte Unterschiede. So ist das "Sommerhorn" bei der transmissionselektronenmikroskopischen Untersuchung durch ein vermehrtes Auftreten von rissartigen, optisch leer erscheinenden Erweiterungen des Interzellularspalt gekennzeichnet. Diese Mikrorisse, die sich im Grenzbereich zwischen dem Interzellularkitt und der Zelloberfläche befinden, sind im "Winterhorn" seltener zu beobachten. Eine bedeutende Schwachstelle im "Sommerhorn" ist somit die Verankerung des Kittes an dem äußeren Anteil des cornified cell envelope. Da die Kittsubstanz weitgehend als schmales, zusammenhängendes Band im erweiterten Interzellularspalt erkennbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Mikrorisse häufig erst nach dem Ausschleusen der MCGs und der vollständigen Aushärtung des quantitativ unveränderten interzellulären Materials im vormals gleichmäßig engen Interzellularspalt entstanden sind. Eine gesteigerte Synthese von minderwertigem Interzellularkitt, wie er von einigen Autoren (BRAGULLA u. BUDRAS, 1999; MARKS, 1984; MÜLLING u. BUDRAS, 1998; MÜLLING et al., 1997 u. 1999) im Zusammenhang mit einem erweiterten Interzellularspalt bei dyskeratotischem Horn beschrieben wird, lässt sich demzufolge nicht feststellen.

Während die Verankerung der lebenden Epidermiszelle an der Interzellulärsubstanz ausschließlich durch spezifische Proteine (Integrine und Cadherine) bewirkt wird (DEUGNIER et al., 1999; JONES et al., 1995), sind im Stratum corneum zusätzlich kovalente Bindungen

zwischen dem cornified cell envelope und der Kittsubstanz ausgebildet. Dabei ist bisher nicht geklärt, ob die Befestigung des Kittes an der Zelloberfläche durch Proteine (HAFTEK et al., 1991) oder durch Lipide (WERTZ et al., 1989) erfolgt. Diese Zelladhäsionsmoleküle scheinen im "Sommerhorn" verändert zu sein, so dass es zur Bildung der oben genannten Mikrorisse kommt. Bei der gelelektrophoretischen Untersuchung lassen sich allerdings keine jahreszeitlich bedingten Unterschiede im Proteinbandenmuster feststellen. Das könnte entweder als Hinweis darauf gedeutet werden, dass die veränderten Zelladhäsionsmoleküle vorwiegend Lipide sind oder dass das Molekulargewicht der betroffenen Proteine unverändert bleibt, obwohl sich ihre mechanischen Eigenschaften ändern.

Mit zunehmendem Ausmaß der Mikrorisse tritt eine Verschlechterung der mechanischen Stabilität ein. Dieser Zusammenhang wurde bereits von zahlreichen anderen Autoren beschrieben (BUDRAS u. BRAGULLA, 1991; KEMPSON u. LOGUE, 1993; MÜLLING u. BUDRAS, 1998; MÜLLING et al., 1999). Durch die Loslösung des Kittes von der Hornzelloberfläche wird zum einen der Zusammenhalt des Hornzellverbandes reduziert, was zur geringeren Härte des "Sommerhornes" der untersuchten Przewalskipferde beitragen könnte. Zum anderen ist die feste Verankerung der Kittsubstanz an der Hornzelle auch für die Undurchlässigkeit des Interzellularraumes gegenüber chemischer und mikrobieller Noxen bedeutsam (BUDRAS et al., 1989; LANDMANN, 1988; MÜLLING u. BRAGULLA, 1997). Insbesondere im "Sommerhorn" der untersuchten Przewalskipferde ist diese interzelluläre Permeabilitätsbarriere durch die zahlreichen Mikrorisse nur unzureichend ausgebildet.

Die beschriebenen jahreszeitlich bedingten Unterschiede der Hornarchitektur und der interzellulären Faktoren lassen sich nicht nur bei Przewalskipferden feststellen, denn KÖNIG (in Vorb.) beobachtet auch bei Warmblutpferden ähnliche Veränderungen der Hornstruktur, die jedoch deutlich geringer ausgeprägt sind als bei den Wildpferden.

Wahrscheinlich sind die jahreszeitlichen Unterschiede der Hornqualität auch für die Entstehung der Tragrandausbrüche verantwortlich, die bei den untersuchten Przewalskipferden in den Monaten Mai bis August beobachtet werden konnten. Möglicherweise ist das im Winter gebildete Horn so widerstandsfähig, dass es nur einem geringen Hornabrieb am Tragrand unterliegt. Aufgrund der fortwährenden Hufhornproduktion am Kronrand kommt es besonders in den Monaten März bis Mai zu einer Längenzunahme der Hufe, die nach THOMASON (1998) zu einer Erhöhung der Spannungen innerhalb der Hufkapsel führt. Diese Spannungen sind nach DEJARDIN et al. (1999) im Bereich des Margo solearis des Hufbeins am größten. Erreichen sie aufgrund der erhöhten Hebelwirkung einen gewissen Grenzwert, kommt es zu Tragrandausbrüchen. Die "Sollbruchstelle" befindet sich dabei insbesondere in dem Bereich, wo die Hufplatte keine feste Verbindung zum Sohlenhorn mehr besitzt. An diesen Stellen befindet sich mit großer Wahrscheinlichkeit Horn, das im Sommer des Vorjahres gebildet wurde und demzufolge eine geringere mechanische Stabilität aufweist. Ein Zusammenhang zwischen den jahreszeitlichen Unterschieden der Hornqualität und dem Auftreten von Tragrandausbrüchen lässt sich auch aus den Ergebnissen der Materialprüfung

und der strukturellen Untersuchungen der herausgebrochenen Hornchips ableiten. Während die Horneigenschaften am Tragrand dem "Winterhorn" entsprechen, weist das an der Bruchkante der Hornchips entnommene Kronhorn Kennzeichen des "Sommerhornes" auf.

Trotz der teilweise erheblichen Hornverluste zeigten die betroffenen Przewalskipferde in der Regel keine Lahmheit. Lediglich bei einem Pferd war nach dem Ausbruch eines extrem großen Hornstücks ein "klammer" Gang zu beobachten. In der freien Wildbahn wäre das sicherlich ein Todesurteil für das betroffene Pferd, bei den in Gefangenschaft gehaltenen Przewalskipferden können die Tragrandausbrüche, die bereits BUDRAS und SCHIEL (1996a) als natürliches Phänomen des Hornverlustes bei Wildpferden beschreiben, jedoch als eine Art saisonaler Selbstregulierungsmechanismus der Huflänge bei unzureichendem Hornabrieb angesehen werden. Hufkorrekturen sind bei den im Semireservat gehaltenen Przewalskipferden daher oftmals überflüssig. Das ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da derartige Manipulationen eine Immobilisierung der Tiere voraussetzen, die mit erheblichen Risiken für das betroffene Pferd, aber auch mit großer Aufregung und Belastung für die gesamte Herde verbunden ist.

Die jahreszeitlichen Unterschiede der Hornqualität sind durch mehrere Faktoren bedingt. Von besonderer Bedeutung für die epidermale Differenzierung ist die ausreichende und balancierte Versorgung der verhornenden Zellen mit Nähr- und Baustoffen (MÜLLING u. BUDRAS, 1998; MÜLLING et al., 1999). So ist für die Synthese der intra- und interzellulären Proteine eine ausgewogene Zufuhr an Aminosäuren essentiell. Um eine feste Verknüpfung der intrazellulären Strukturproteine über Disulfidbrücken zu gewährleisten, ist insbesondere die schwefelhaltige Aminosäure Cystein bedeutsam (CLARK u. RAKES, 1982; MACLEAN, 1971). Für den Aufbau der Zellmembran und des Interzellularkittes ist nach OFFER und LOGUE (1998) außerdem eine optimale Versorgung mit Fettsäuren erforderlich. Daneben sind auch Vitamine wie das Biotin (Vitamin H), das die Eigenschaften des Interzellularkittes und der intrazellulären Strukturproteine beeinflusst (HOCHSTETTER, 1998; WÄSE et al., 1997), oder das Vitamin A, das eine modulierende Funktion bei den epidermalen Differenzierungsprozessen besitzt (DALE et al., 1993; WANNER et al., 1999), für die Hornqualität von Bedeutung. Von den Mineralstoffen ist insbesondere Kalzium wichtig, da es die Synthese differenzierungsspezifischer Proteine moduliert (YUSPA et al., 1989) und darüber hinaus eine Rolle für den Zusammenhalt der Hornzelle spielt (BISSETT et al., 1987; KEMPSON, 1996). Auch eine ausreichende Versorgung an Zink und Kupfer ist bedeutend für die Hornqualität, da diese Spurenelemente die Bildung von Disulfidbindungen zwischen den intrazellulären Strukturproteinen fördern (BAGGOTT et al., 1988; GAN u. STEINERT, 1993).

Ein Mangel an den genannten Substraten führt zu Störungen im Keratinisierungs- und Verhornungsprozess und demzufolge zu einer minderwertigen Hornqualität (MÜLLING u. BUDRAS, 1998; MÜLLING et al., 1997). Da die Epidermis selbst gefäßfrei ist, muss ihre Versorgung durch Diffusion aus den Blutgefäßen der Huflederhaut erfolgen (MÜLLING et al., 1994b). Dabei ist die Versorgungslage der verhornenden Epidermiszellen zum einen von der

Blutkonzentration der Nährstoffe und zum anderen von der Distanz zwischen der Epidermiszelle und dem Lederhautblutgefäß abhängig (MÜLLING et al., 1999). Die absolute Blutkonzentration der Nähr- und Baustoffe sowie die Durchblutungsrate der Huflederhaut scheinen für die Ausbildung der jahreszeitlich bedingten Qualitätsunterschiede jedoch nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Aufgrund des verminderten Nahrungsangebotes und der zur Thermoregulation reduzierten Durchblutung der Huflederhaut wäre nämlich eine Qualitätsminderung des Hornes eher in den Wintermonaten zu erwarten. Da bei den untersuchten Przewalskipferden im Winter jedoch eine bessere Hornqualität zu verzeichnen ist als in den Sommermonaten, ist davon auszugehen, dass die geringe Nährstoffversorgung für die geringe Hufhornproduktion in dieser Jahreszeit ausreicht. Bedeutsamer für die Ausbildung der saisonalen Unterschiede der Hornqualität ist demzufolge vermutlich die Länge der Diffusionsstrecke, die durch den Jahresrhythmus der epidermalen Proliferationsrate beeinflusst wird.

Da die Proliferationsrate der Kronepidermis in den Wintermonaten vergleichsweise niedrig ist, bleiben die verhornenden Zellen lange in der Nähe der ernährenden dermalen Blutgefäße. Dadurch steht für die epidermalen Differenzierungsprozesse viel Zeit zur Verfügung, so dass eine vollständige Ausreifung der Hornzellen und somit eine gute Hornqualität gewährleistet wird. Im Sommer entfernen sich die verhornenden Epidermiszellen dagegen infolge der hohen Proliferationsrate schneller von der Lederhautunterlage. Die Folge ist eine rasche Verlängerung der Diffusionsstrecke für Nähr- und Baustoffe, wodurch eine ungünstige Versorgungslage der verhornenden Zellen bedingt wird. Dies führt vermutlich zu einer unvollständigen und frühreifen Keratinisierung der Zellen und somit zur Bildung von qualitativ minderwertigerem Horn.

Ein ähnliches Prinzip liegt den Qualitätsunterschieden von Röhrenmark und Röhrenrinde zugrunde. Im Bereich des suprapapillär gebildeten Röhrenmarkes werden die verhornenden Zellen rasch von den ernährenden Blutgefäßen der Lederhaut abgeschnitten und verhornen infolgedessen nur unvollständig. Die peripapillär gebildeten Rindenzellen bleiben dagegen längere Zeit in der Nähe der dermalen Blutgefäße und können daher optimal keratinisieren und aushärten (BUDRAS u. MÜLLING, 1998; BUDRAS et al., 1998a). Eine negative Korrelation zwischen Hornbildungsrate und Hornqualität beschreiben BUDRAS et al. (1996) auch für das Wandhorn der Rinderklaue.

Aus den bisherigen Ausführungen lässt sich schlussfolgern, dass die bei den Przewalskipferden beobachtete Jahresrhythmik der Hornbildungsrate einen erheblichen Einfluss auf die Hornqualität ausübt. Daneben müssen jedoch auch andere Faktoren berücksichtigt werden, die in Abhängigkeit von der Jahreszeit variieren. So spielen beispielsweise Hormone ebenfalls eine Rolle. Das im Zusammenhang mit der Licht-induzierten Beeinflussung der Hornbildungsrate bereits genannte Prolaktin hat nach HENDRY et al. (1998) zwar keine Auswirkung auf die Horneigenschaften, eine schlechte Hornqualität wird nach Meinung dieser Autoren jedoch durch eine niedrige Insulinkonzentration bzw.

durch eine hohe Blutkonzentration von Glukokortikoiden bewirkt. Die Freisetzung beider Hormone, die einer zentralen Kontrolle durch den Hypothalamus und die Hypophyse unterliegt, ist nach LINCOLN und RICHARDSON (1998) abhängig von der *Tageslichtlänge*, wobei in den Sommermonaten die Blutkonzentration an Insulin deutlich niedriger und der Cortisolgehalt des Blutes etwas höher ist als im Winter. Die bei den Przewalskipferden festgestellten Unterschiede der Hornqualität korrelieren folglich mit den Schwankungen dieser beiden Hormone.

Die jahreszeitlich bedingten Unterschiede der Hornarchitektur hängen vermutlich mit der in Abhängigkeit von der Jahreszeit variierenden Durchblutungsrate der Huflederhaut zusammen. Wie bereits im Zusammenhang mit der Hornbildungsrate ausführlich diskutiert wurde, führen die niedrigen *Umgebungstemperaturen* und die geringe *Bewegungsaktivität* der Pferde im Winter zu einer verminderten Durchblutung der Kronlederhautpapillen. Durch den reduzierten Blutfluss dürfte es zu einer Lumenverengung der zahlreichen Blutgefäße innerhalb der Papillen und somit zu einer Verringerung des Papillendurchmessers kommen. Eine derartige Größenveränderung der Lederhautpapillen müsste trotz ihrer festen Verankerung in der Hufepidermis möglich sein, weil die lebenden Epidermisschichten sowie das junge Horn eine hohe Flexibilität aufweisen. Da das Oberflächenrelief der Huflederhaut die Architektur der Hufepidermis bestimmt (ZIETZSCHMANN, 1918), besitzen auch die im Winter über den dermalen Papillen gebildeten Hornröhrchen einen geringeren Durchmesser. Die vermehrte Durchblutung der Huflederhaut im Sommer dürfte dagegen eine Dickenzunahme der Lederhautpapillen und somit eine Vergrößerung der Hornröhrchen bewirken.

In diesem Zusammenhang lässt sich auch das Phänomen der sogenannten "Wachstumsringe" erklären. Jegliche Veränderung der dermalen Durchblutungsrate (beispielsweise durch Schwankungen der Umgebungstemperatur oder der Bewegungsaktivität der Pferde) dürfte eine unterschiedliche Größe und Dichte der Hornröhrchen bedingen, wodurch an der Hufoberfläche Unregelmäßigkeiten in Form von Rillen bzw. Wülsten entstehen.

Die Durchblutung der Huflederhaut hat durch die Beeinflussung der epidermalen Proliferationsrate auch einen indirekten Effekt auf die Hornqualität. Wie bereits dargelegt wurde, führt eine vermehrte dermale Durchblutung zu einer erhöhten Zellproliferation in der Hufepidermis, die ihrerseits einen negativen Einfluss auf die Hornqualität ausübt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Hufhornqualität - ebenso wie die Hornbildungsrate und der Hornabrieb - multifaktoriell beeinflusst wird. Von besonderer Bedeutung sind die saisonalen Unterschiede der epidermalen Proliferationsrate, die in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der Bewegungsaktivität der Pferde variierende Durchblutungsrate der Huflederhaut sowie der im Zusammenhang mit Änderungen der Tageslichtlänge schwankende Hormonhaushalt, während die jahreszeitlich unterschiedliche Nährstoffversorgung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Bei Berücksichtigung des umgekehrt proportionalen Verhältnisses von Hornqualität und Hornbildungsrate stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, die Hufhornproduktion durch eine Einreibung des Kronrandes mit hyperämisierenden Salben anzuregen. Die Anwendung derartiger Hufsalben wird beispielsweise als Therapie bei Hornspalten und Hufabszessen vorgeschlagen (BECKER, 1998), häufig werden diese Salben jedoch auch ohne medizinische Indikation benutzt. Es ist nicht auszuschließen, dass die verstärkte Durchblutung der Lederhaut auch in diesem Fall zu einer negativen Beeinflussung der Hornqualität führt. Eventuell wurde ein solcher Zusammenhang bisher nicht erkannt, weil es etwa ein Jahr dauert, bis das am Kronrand des Hufrückens gebildete Horn den Tragrand erreicht. Da eine Qualitätsminderung des Hufhornes die Bildung von Hornspalten und Tragrandausbrüchen begünstigt (ROONEY, 1999; RUTHE, 1997), dürfte eine Untersuchung der Wirkung von durchblutungsfördernden Hufsalben auf die Hornqualität sicherlich sehr interessant sein.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Hornqualität bei den untersuchten Przewalskipferden erheblichen jahreszeitlichen Veränderungen unterliegt. Die beobachteten saisonalen Unterschiede sind so bedeutend, dass sich eine Vernachlässigung in zukünftigen Untersuchungen über eine Qualitätsänderung des Hornes (z.B. zur Prüfung des therapeutischen Erfolges von Futterzusatzstoffen wie Zink oder Biotin) verbietet.

Die innerhalb der Hufplatte festgestellten Unterschiede verdeutlichen, dass bei derartigen Untersuchungen darüber hinaus auch die jeweiligen Probenentnahmestellen beachtet werden müssen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ist das Horn stets aus sich entsprechenden Lokalisationen zu entnehmen.

Offensichtlich ist es infolge der Domestikation zu einer Abschwächung der jahreszeitlich bedingten Schwankungen gekommen ist. Dabei spielt die veränderte Haltung der Pferde sicherlich eine bedeutende Rolle. Es bleibt zu klären, ob sich auch bei Hauspferden eine stärkere Ausprägung der Jahresrhythmik hinsichtlich der Hornbildungsrate und damit zusammenhängend der Hornqualität feststellen lässt, wenn die Pferde unter Semireservat-Bedingungen gehalten und somit den jahreszeitlichen Einflüssen intensiv ausgesetzt werden.