

5. DISKUSSION

5.1. Blutparameter

5.1.1. Laktat

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen in bezug auf das Laktat zeigen, daß keine der von uns gewählten Versuchsbedingungen zu einer Laktacidose führt. Eine Laktacidose entsteht dann, wenn eine körperliche Belastung zu einem Sauerstoffmangel des Metabolismus führt, der nicht mehr mit Hilfe einer verstärkten Atmung oder Herzleistung kompensiert werden kann. Keines der sieben Pferde erreicht bei einer der sechs Belastungen annähernd die anaerobe Schwelle von 4 mmol/l, deren Übertreten zu einer Laktatakkumulation im Organismus infolge der anaeroben Energieproduktion führt (Mader et al., 1976; Kindermann et al., 1979).

Alle von uns erhobenen Werte liegen in einem relativ engen Bereich unterhalb des physiologischen Ruhewertes von 2 mmol/l (Asheim et al., 1970) bzw. unterhalb oder nur gering über dem von Krzywanek et al. (1972) und Gill et al. (1987) ermittelten Richtwert von 1 mmol/l.

Die Beobachtung, daß das Ausmaß der Laktatbildung von der Art, der Dauer und der Intensität der Belastung abhängt (Krzywanek et al., 1972), können wir in unserer Untersuchung somit bestätigen. Laktatkonzentrationen, wie von Asheim et al. (1970) nach submaximaler oder von Harris und Snow (1988) nach kurzzeitiger maximaler Belastung gemessen, werden in unserer Untersuchung nicht annähernd erreicht. Daraus ist zu schließen, daß die Pferde in unseren Versuchen, infolge einer Steigerung der Atmung und der Herzfrequenz und einer Zunahme der O₂-Kapazität durch die Mobilisierung des Blutzellreservoirs der Milz, in der Lage waren, den durch die Belastung bedingt höheren Sauerstoffbedarf zu kompensieren.

Auch ein Vergleich unserer Ergebnisse mit denen bei Sportlern im Aquatraining (Benecke et al., 1996; Salchow, 1994; Town und Bradley, 1991) zeigt, daß die Pferde entweder besser imstande waren, die von ihnen verlangte Leistung zu kompensieren oder daß die gewählten Belastungen für die Pferde niedriger waren als die der Sportler. Bei den Sportlern stieg der Laktatspiegel nach 3 Minuten Laufen

(1 m/s) in 60 cm und 90 cm tiefen Wasser im Vergleich zum Ruhewert und zum Laufen an Land signifikant an (Salchow, 1994). Beneke et al. (1996) fanden nach 3 Minuten Laufarbeit in 60 cm tiefen Wasser deutlich höhere Blutlaktatspiegel bei einer Geschwindigkeit von 1.33 m/s (13.3 ± 2.3 mmol/l) als bei 1 m/s (3.6 ± 1.0 mmol/l) oder bei 0.5 m/s (1.2 ± 0.2 mmol/l).

In unseren Versuchen führen weder die unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Schritt: $\bar{x} = 94 \pm 5$ m/min bzw. Trab: $\bar{x} = 174 \pm 8$ m/min) noch die unterschiedlichen Wassertiefen (Trocken; Wasserhöhe Karpalgelenk; Wasserhöhe Ellenbogengelenk) zu einem signifikanten Anstieg des Laktatspiegels bei einem der Pferde.

In Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die drei im Skelettmuskel vorhandenen Fasertypen abhängig von Gangart, Geschwindigkeit (Valberg, 1986) und Dauer der Belastung (Hodgson et al., 1983; Sullivan and Armstrong, 1978) selektiv beansprucht werden (von Typ I über Typ IIA hin zu Typ IIB). Anhand der von uns gemessenen niedrigen Laktatwerte ist anzunehmen, daß hauptsächlich die oxidativ arbeitenden Muskelfasern von Typ I beansprucht wurden. Es wird also Arbeit im aeroben Bereich bei dieser Trainingsform geleistet. Auch beim Menschen hat sich gezeigt, daß beim Trainieren im Wasser durch das Bremsen der Bewegungen im Wasser (höhere Dichte als Luft) viel Kraft aufgewendet werden muß, so daß hauptsächlich die langsam kontrahierenden, sehr ermüdungsresistenten Slow-twitch-Fasern beansprucht werden und die aerobe Ausdauer trainiert werden kann (Dargatz and Koch, 1995).

Zusätzlich kann festgehalten werden, daß bei der von uns gewählten Form des Aquatrainings der Trainingsstand kaum von Einfluß auf den Laktatgehalt ist. Dies steht in Gegensatz zu anderen Trainingsmethoden, die z.B. für Traber (Krzywanek et al., 1977) oder für Vollblüter (Bayly et al., 1987) beschrieben wurden, bei denen bei den trainierten Pferden niedrigere Laktatwerte zu finden waren als bei untrainierten. Für unsere Untersuchung wählten wir sieben unterschiedlich trainierte Pferde unterschiedlichen Alters aus. Einige waren trainierte Vielseitigkeitspferde während andere weniger trainierte Reitpferde oder Freizeitpferde waren. Bei keinem der Pferde zeigten sich signifikante Unterschiede infolge der verschiedenen Belastungen.

Laut Literatur steigt der Laktatspiegel im Blut nach Belastungsende zunächst noch weiter an und erreicht den Höchstwert erst 5 bis 10 Minuten danach. Zudem können bei entsprechender Belastung auch nach 30 Minuten noch deutlich erhöhte Werte festgestellt werden (Harris et al., 1991; Krzywanek et al., 1976). Eine Gegenüberstellung der bei jeder der sechs Belastungen genommenen drei Blutproben (Ruhewert; 5-Minuten-Wert; 30-Minuten-Wert) zeigt, daß weder 5 Minuten noch 30 Minuten nach der eigentlichen Belastung signifikante Unterschiede im Vergleich zu den Ruhewerten auftreten. Wenn die von den Pferden verlangte Arbeit zu einer deutlichen Erhöhung der Laktatkonzentration geführt hätte, dann hätten auch trotz der Tatsache, daß leichte körperliche Arbeit in der Restitutionsphase den Laktatabbau beschleunigt (Dodd et al., 1984; Krzywanek, 1988), beim 5-Minuten-Wert, bis zu dessen Entnahme die Pferde noch Schrittarbeit verrichten mußten, zumindest noch deutlich erhöhte Laktatwerte im Vergleich zum Ruhewert zu finden sein müssen.

Anhand der Laktatwerte zeigt die Untersuchung also, daß ein Aquatraining gemäß unseres Versuchsregimes eine aerobe Belastung der Pferde darstellt und somit als eine Form des Ausdauertrainings genutzt werden kann.

5.1.2. pH

Die in Tabelle 5 und 23 aufgeführten Ergebnisse zeigen, daß die von uns gemessenen pH-Ruhewerte im oberen Bereich der als physiologische Referenz (7.32-7.44) angegebenen Spanne liegen (Wirth, 1995). Der Organismus ist bemüht, den pH-Wert innerhalb dieser Grenzen zu halten. Sowohl 5 Minuten als auch 30 Minuten nach Belastungsende der sechs verschiedenen Leistungsanforderungen liegen die gemessenen pH-Werte über den Ruhewerten (da die Unterschiede insgesamt sehr gering sind, kann der Signifikanz einiger Unterschiede zwischen den verschiedenen Belastungen keine besondere physiologische Bedeutung im Vergleich zu den nicht signifikanten beigemessen werden). Es ist also eine moderate Alkalose infolge der Belastungen zu verzeichnen. Aus der zusätzlichen Tatsache, daß nach keinem der Versuche erhöhte Laktatwerte auftreten, läßt sich also schließen, daß die verlangten Leistungen zu keiner metabolischen Acidose führen. Vielmehr kommt es

infolge der Bedarfsanpassung an den bei körperlicher Leistung im Organismus steigenden O₂-Bedarf zu einer Hyperventilation. Infolge dieser wird gleichzeitig der angestiegene pCO₂ vermehrt abgeatmet, wodurch auch die H⁺-Konzentration sinkt. Obwohl von uns nicht gemessen, ist zu vermuten, daß durch die in den 5 Minuten bis zur 2. Blutprobe (5-Minuten-Wert) noch zu leistende Schrittarbeit und auch innerhalb der 25 Minuten dauernden Ruhephase unter dem Solarium bis zur 3. Blutprobe (30-Minuten-Wert) noch erhöhte Atemfrequenzen und wahrscheinlich auch höhere Atemzugvolumina auftreten, die eine moderate respiratorische Alkalose verursachen. Unsere Ergebnisse stimmen mit denen der Untersuchung von Pinkowski (1997) überein, bei welchen 15 Minuten nach dem Aufwärmheat (1700 m bei einer Kilometerzeit zwischen 1:32 und 1:40 min) auch ein Anstieg des pH-Wertes von 7.44 ± 0.025 in Ruhe auf 7.451 ± 0.025 meßbar war. Der Verlust von Chloridionen durch die Schweißbildung, der von Rose et al. (1979) als Ursache der Alkalose angesehen wird, ist in unserer Untersuchung von untergeordneter Bedeutung, da das Ausmaß des Schweißverlustes, erkennbar an der gemessenen GE-Konzentration, vernachlässigt werden kann.

5.1.3. Hämoglobin, Hämatokrit und Erythrozytenzahl

Aufgrund ihres analogen Verhaltens werden diese drei Parameter hier zusammen besprochen.

Alle erhobenen Werte liegen innerhalb der von Kraft et al. (1995a) angegebenen physiologischen Grenzen. Die Beobachtung, daß die Erythrozytenzahl, der Hämoglobingehalt und der Hämatokrit bei physischer Anstrengung infolge der Ausschüttung der Blutreserven aus der Milz ins Blut ansteigen (Krzywanek et al., 1972; Rose et al., 1983a), können wir mit unserer Untersuchung bestätigen. Bei allen drei Parametern ist ein deutlicher Anstieg infolge der Belastungen zu verzeichnen. Die vier Versuche im Wasser (SK, SE, TK, TE) führen zu einer signifikant höheren Freisetzung von Erythrozyten und zu signifikant höheren Werten des Hb-Gehaltes und des Hkt im Vergleich zum Ruhewert. Innerhalb der Belastungsstufen bestehen jedoch keine signifikanten Unterschiede. Da Rose et al. (1983a) in einem standardisierten Belastungstest auf den Laufband nach 15 Minuten Trabrennen (200 m/min) (Hb 180.0 ± 12.6 g/l, Hkt 0.52 ± 0.04 , RBC $11.6 \pm 0.6 \times 10^{12}/l$) Werte

ähnlich denen bei Distanzritten (Rose et al., 1979) fanden, die jedoch nicht das Niveau der von Keenan (1979) nach maximaler Leistung erreichten, beurteilen sie ihr Versuchsregime als submaximale Arbeit. Die Konzentrationen unserer Parameter liegen in ähnlichen Bereichen wie die von Rose et al. (1983a), meist jedoch etwas darunter. Da auch die Stärke der körperlichen Anstrengung das Ausmaß der Milzentspeicherung bestimmt (Rose and Allen, 1985), können die niedrigeren Werte durchaus durch die niedrigere Geschwindigkeit in unseren Versuchen begründet sein (Trab: $\bar{x} = 174 \pm 8$ m/min). Man kann daraus schließen, daß in unserer Untersuchung die von den Pferden verlangte Arbeit ebenfalls submaximal war.

Neben der körperlicher Belastung spielt auch die psychische Erregung eine wesentliche Rolle für die Entspeicherungsreaktion der Milz (Krzywanek et al., 1972; Revington, 1983). Nicht nur bei körperlicher Arbeit, sondern auch infolge Aufregung und Streß erfolgt, bedingt durch eine Adrenalinausschüttung, eine Freisetzung der Erythrozyten aus der Milz (Persson et al., 1973; Snow, 1979). Während der Versuche zeigte sich, daß die Pferde durch die Blutentnahmen (invasive Methode), die Belastungen, die Umgebung und die Geschehnisse um und im Aquatrainer in unterschiedlichem Maße gestreßt wurden. Dies scheint die Erklärung für die breite Streuung einiger Werte zu sein. So war z.B. Pf.5 das jüngste der in die Untersuchung einbezogenen Pferde und es war am wenigsten an gehorsamen Umgang gewöhnt. Trotz der für alle Pferde mehrere Tage dauernden Eingewöhnungszeit zeigte dieses Pferd während der drei Schrittversuche eine hohe psychische Erregung und weist hierfür auch jeweils höhere Werte verglichen mit den Trabversuchen auf, bei denen es dann sichtlich entspannter und ruhiger war. Pf.6 war hingegen bei den Blutentnahmen in der Box sehr aufgeregt und angespannt, verhielt sich während des Schritt-Trocken-Versuches und der nachfolgenden Blutproben aber auffallend ruhig und entspannt.

Bei der Analyse des Abklingverhaltens der drei Parameter mit Hilfe der Ruhe-, 5-Minuten- und 30-Minutenblutprobe ergeben sich ähnliche Verhältnisse wie in der Untersuchung von Rose et al. (1983a). Ausgehend von den jeweiligen Ruhewerten führen sowohl die Schrittversuche im Wasser (SK, SE) als auch alle drei Versuche im Trab (TT, TK, TE) zu Entspeicherungsreaktionen der Milz mit signifikant ansteigender Erythrozytenzahl, Hb-Gehalt und Hämatokrit 5 Minuten nach den Belastungsphasen.

Weitere 25 Minuten danach (30-Minuten-Wert) sinken die Blutwerte wieder signifikant zum 5-Minuten-Wert ab, und es besteht kein signifikanter Unterschied mehr zu den Ruhewerten. Die von uns gemessenen Erythrozytenzahlen, der Hb-Gehalt und der Hämatokrit 30 Minuten nach Belastungsende liegen gering über denen von Rose et al. (1983a) nach 30 Minuten.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die geforderten Leistungen bestätigen, daß schon moderate Belastungen zu ausgeprägt erhöhten Hämoglobinkonzentrationen, Erythrozytenzahl- und Hämatokritanstiegen führen, auch wenn noch kein deutlicher Laktatanstieg zu verzeichnen ist (Krzywanek, 1974).

5.1.4. Gesamteiweiß

Die gemessenen Gesamteiweißgehalte (GE) liegen alle innerhalb der physiologischen Grenzen zwischen 50-70 g/l (Sommer and Styrie, 1990b) bzw. 55-75 g/l (Kraft et al., 1995c; Rose und Hodgson, 1994b). Aus der Tatsache, daß die Höhe der GE-Konzentration von der Arbeitsintensität und -dauer abhängt (Harris und Snow, 1988; Judson et al., 1983), weder in Ruhe noch 5 Minuten oder 30 Minuten nach Belastungsende bei einem der Pferde signifikante Anstiege der Proteinfraction des Blutplasmas zu verzeichnen sind und zudem auch keine Anstiege des sauren Stoffwechselmetaboliten Laktat auftreten, läßt sich schließen, daß die Intensitäten und die Dauer der Belastungen so gewählt waren, daß es nicht zu der von Snow und MacKenzie (1977) beschriebenen Flüssigkeitsverschiebung vom Intravasalraum in das Interstitium infolge eines gesteigerten osmotischen Druckes kam. Auch die bei Ausdauerbelastungen (meistens hauptsächlich aerobe Arbeit) überwiegend für die Anstiege der GE-Konzentration verantwortlichen Wasserverluste infolge der Evaporation über die Lunge und der Transpiration (Carlson, 1983; Rose, 1986; Snow et al., 1983), scheinen hier keine große Rolle zu spielen. Es sei aber angemerkt, daß bei den Pferden, besonders bei den Versuchen im Trab, verschiedentlich durchaus eine Schweißsekretion zu beobachten war. Jedoch war das Ausmaß anscheinend zu gering, um Veränderungen im Flüssigkeitshaushalt zu bewirken. Bei den Versuchen im Wasser findet zudem eine Kühlung des Körpers durch das Wasser statt. Liegt die Temperatur des Wasser dabei unter der des Körpers, kann der bei gesteigerter

Stoffwechselleistung entstehende Wärmeüberschuß durch das niedriger temperierte Wasser teilweise kompensiert werden (Dargatz and Koch, 1995). Steigerungen der GE-Konzentration um 9% nach submaximaler oder 14% nach maximaler Arbeit (Judson et al., 1983) oder Werte von 89.0 ± 11.0 g/l (Rose et al., 1979) wurden nicht annähernd erreicht.

Schlußfolgernd kann man also sagen, daß bei den für das Aquatraining gewählten Geschwindigkeiten und Wassertiefen Leistung im aeroben Bereich erbracht wird, und daß der Wasserverlust des Körpers über Transpiration und Lunge hierbei sehr gering gehalten werden kann.

5.1.5. Serumenzyme (CK, AST, LDH und ALT)

Alle Ruhewerte der vier gemessenen Enzyme liegen in den physiologischen Normbereichen (CK: <130 U/l; AST: <200 U/l; LDH: <350 U/l; ALT: <15 U/l) (Kraft et al., 1995b; Sommer and Styrie, 1990a). Keiner der sechs gewählten Belastungstests führt zu einer signifikanten Erhöhung der Enzymaktivitäten bei der Blutprobe 5 Minuten nach Belastungsende; auch hier werden die Grenzen der physiologischen Werte nicht annähernd erreicht. Sowohl das „muskelspezifische“ Enzym CK, als auch die bei anstrengenden Skelettmuskelbelastungen ansteigende AST und LDH zeigen nur sehr geringe Aktivitätsanstiege. Das gegenüber Organläsionen relativ unempfindliche Enzym ALT wird infolge der Belastungen nicht verändert (RR: 5 U/l; ST-TE: 5-6 U/l).

Da Höchstwerte der Enzymaktivitäten aber erst 5h bis circa 24h nach Belastungsende erreicht werden, kann eine genaue Beurteilung der Testauswirkung erst anhand des Abklingverhaltens vorgenommen werden.

Beim Vergleich der vier Blutproben (1.- 4. BP) zeigt sich, daß neben der 2. Blutprobe (5-Minuten-Wert) auch nach 30 Minuten und 24h kein signifikanter Anstieg der Enzymeaktivitäten im Vergleich zum Ruhewert auftritt.

Dies weist darauf hin, daß keine der sechs Belastungsstufen eine ungewohnte oder übermäßige Belastung der Skelettmuskulatur mit nachfolgenden Membranschäden

oder sogar Zellnekrosen für eines der sieben Pferde bedeutete (Schmidl, 1985). Auch scheint die Form der Belastung nicht zu einer deutlichen Veränderung der Zellpermeabilität zu führen, die die Ursache für einen Anstieg der Enzymaktivitäten im Blut sein kann (Anderson, 1975; Snow et al., 1983).

Die Untersuchungen von Grün et al. (1977) zeigten, daß das Ausmaß der Enzymanstiege von der Intensität der Belastung (Laufgeschwindigkeit) abhängt. Die in der Vorbereitungsphase gewählte Belastung (1600 m Trab) hatte nur geringe (nicht signifikante) Anstiege zur Folge, während die Prüfbelastung (1600 m Galopp) jedoch zu signifikanten Zunahmen der Enzymaktivitäten führte. Zusätzlich zeigte sich, daß der Trainingsstand das Ausmaß der Aktivitätsanstiege beeinflusst. Während ungenügend trainierte oder überlastete Pferde deutliche Anstiege zeigten, blieben die Enzymspiegel bei gut trainierten gleich oder stiegen nur geringgradig an.

In unserer Untersuchung war die Belastungsintensität (Geschwindigkeiten und Wasserspiegelhöhen) so gewählt, daß bei keinem der Pferde, obwohl Probanden mit unterschiedlichem Trainingsstand einbezogen waren, die Leistungsfähigkeitsgrenze mit einem Austritt der Enzyme aus den Zellen überschritten wird.

Schlußfolgernd kann man sagen, daß ein Aquatraining gemäß unseres Versuchsregimes auch für Pferde geeignet ist, die nach längeren Ruhephasen wieder belastet werden können (Rehabilitation) und bei denen starke Übersäuerungen der Muskulatur infolge Laktatbildung und Muskelzellschäden mit nachfolgenden Enzymaktivitätsanstiegen verhindert werden sollen. Der große Vorteil des Aquatrainings in der Rehabilitation besteht aber auch darin, daß im Gegensatz zum Schwimmen gerade die Muskelgruppen trainiert werden, die auch beim normalen Laufen an Land beansprucht werden, und daß das Wasser beim Aufsetzen der Gliedmaßen auf dem Boden wie ein Schutzkissen gegen die Erschütterungen wirkt (Snow and Vogel, 1987b).

5.2. Zeitbereichsparameter der HRV

5.2.1. Herzfrequenz

Die durchschnittliche Ruheherzfrequenz aller Pferde liegt mit 32 ± 1.6 bpm innerhalb der physiologischen Grenzen von 25 bis 40 Schlägen pro Minute (Evans, 1994). Die in der Literatur beschriebenen Höchstwerte zwischen 210-240 bpm infolge körperlicher Belastung (Asheim et al., 1970; Krzywanek et al., 1970) werden während unserer Teststufen nicht annähernd erreicht. Die höchste gemessene durchschnittliche individuelle Herzfrequenz beträgt 125 bpm (Pf.3 bei TE) und bei den Medianen liegt der höchste Wert bei 96 ± 11.8 bpm (TE). Während die Herzfrequenzen bei SK und SE den von Snow und Vogel (1987a) im Schritt (80 bpm) gemessenen entsprechen, sind während der Trabversuche (TT, TK und TE), aufgrund der von uns gewählten geringeren Geschwindigkeit ($\bar{x} = 174 \pm 8$ m/min), durchschnittlich niedrigere Herzfrequenzen meßbar als die von den genannten Autoren bei 234 m/min (circa 120 bpm) und bei 298 m/min (circa 140 bpm). Die relativ niedrige Geschwindigkeit im Trab wurde aus Gründen der Sicherheit gewählt (mit höherer Geschwindigkeit steigt das Risiko für „Taktfehler“ mit möglichem nachfolgenden Stolpern oder gar Hinfallen der Pferde). Die Herzfrequenz steigt mit zunehmender Geschwindigkeit linear an (Ehrlein et al., 1970). Diese lineare Beziehung zwischen Herzfrequenz und Belastung (Laufgeschwindigkeit) besteht aber nur im Frequenzbereich zwischen 120 und 210 bpm (Persson and Ullberg, 1974). Die Nichtlinearität unterhalb 120 Schlägen pro Minute wird dem Einfluß psychischer Faktoren (Aufregung; Streß) zugeschrieben. Die psychische Beeinflussbarkeit der Belastungsherzfrequenz während submaximaler Belastung ist um so ausgeprägter, je niedriger die relative Belastung (Geschwindigkeit oder Wassertiefe) (Persson, 1983) oder je näher das Pferd dem Ruhezustand ist (Krzywanek et al., 1970). Da die von uns gemessenen Herzfrequenzen unterhalb von 120 bpm liegen, ist anzunehmen, daß psychische Faktoren Einfluß an der Entstehung der Herzfrequenz hatten. So konnten wir z.B. beobachten, daß während des ersten und leichtesten Versuches (ST) einige der Pferde stärker aufgeregt waren als während der folgenden Tests. Dies kann als Ursache für die breite Streuung der Werte bei ST angesehen werden.

Ein Vergleich der Ergebnisse auf trockenem Laufband mit denen im Wasser zeigt, daß bei den Pferden trotz der Tatsache, daß keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchen innerhalb einer Gangart (Schritt oder Trab) auftreten, sich ein tendenzieller Anstieg der HR-Mediane im Verlauf von den leichteren Belastungen (ST) hin zu den anstrengenderen (TK und TE), somit abhängig von Gangart und Wassertiefe, abzeichnet. Zwischen den beiden Gangarten, also den gemittelten drei Schrittmedianen und den drei Trabmedianen, besteht außerdem ein signifikanter Unterschied von 18 bpm. Eine vergleichende Untersuchung von Hall et al. (1998) über kardiorespiratorische Auswirkungen von Laufbandarbeit im Wasser bei Sportlerinnen ergab folgende Ergebnisse. Mit zunehmender Geschwindigkeit stieg die Herzfrequenz sowohl während des Laufens auf dem Laufband an Land, auf dem Laufband in brusttiefem Wasser bei 35.8°C sowie in brusttiefem Wasser bei 28.2°C linear an. Während Laufen auf dem Laufband in Wasser bei 35.8°C bei 3.5 km/h keine signifikant höheren Herzfrequenzen als Laufen an Land bei 3.5 km/h zur Folge hatte, war die Herzfrequenz bei den höheren Geschwindigkeiten (4.5 km/h und 5.5 km/h) im Wasser signifikant höher als an Land. Laufen bei 28.2°C führte bei allen drei Geschwindigkeiten zu einer signifikant niedrigeren Herzfrequenz als der Landversuch.

Die Tatsache, daß die von uns gemessenen Herzfrequenzen nicht annähernd 210 bpm betragen, entspricht zudem den niedrigen Laktatkonzentrationen (nahezu Ruhewerte) nach den Versuchsstufen. Denn frühestens ab 200-210 bpm verliert sich die lineare Beziehung zwischen Herzfrequenz und Geschwindigkeit und die zwischen Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch. Erst bei Erreichen dieses Grenzwertes wird die anaerobe Schwelle überschritten und deutliche Laktatanstiege im Blut treten auf (Persson, 1983; Persson and Ullberg, 1974).

Die relativ niedrigen Werte der Herzfrequenz und des Laktatgehaltes und der nur geringe Unterschied von 18 bpm zwischen den beiden Gangarten verdeutlichen, daß das von uns gewählte Versuchsregime submaximale Leistung von den Pferden verlangt. Auch Snow und Vogel (1987b) sehen im Aquatraining eine Trainingsmethode geringerer Intensität, da Herzfrequenzen von 100 Schlägen pro Minute hierbei nur selten überschritten werden.

5.2.2. IBI

Die IBIs spiegeln die Intervalllängen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Herzschlägen (QRS-Komplexen) wider (Malik, 1996). Bei einem Ansteigen der Herzfrequenz pro Zeiteinheit werden sie somit automatisch kürzer. Wie erwartet zeigen die IBIs einen signifikanten Abfall infolge der sechs Belastungen verglichen mit dem Ruheversuch. Auch hier sind wie bei der Herzfrequenz keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Leistungsanforderungen zu finden. Tendenziell führt eine steigende Belastung aber zu einer immer stärkeren Verkürzung der Intervalle zwischen den R-Zacken, also zu einer tendenziellen Abnahme der IBIs.

5.2.3. SDNN

Wenn die Inter-beat-Intervalle bei steigender Herzfrequenz kürzer bzw. pro Zeiteinheit häufiger werden, ist es interessant zu prüfen, wie sich die Standardabweichung der NN-Intervalle (Quadratwurzel der Varianz), also die SDNN, infolge körperlicher Belastung und unterschiedlicher Intensität verändert. Die SDNN reflektiert, ähnlich wie die TP, die Gesamtvariabilität der Herzfrequenz innerhalb eines definierten Zeitraumes (Bowen, 1999; Malik, 1996).

In unserer Untersuchung ist die SDNN bei allen Pferden in Ruhe signifikant höher als bei Belastung. Dies bedeutet, daß die Intervalllängen in Ruhe stärker um einen Mittelwert schwanken als unter Belastung. In Ruhe sind zusätzlich relativ große Unterschiede zwischen den einzelnen Pferden zu finden. Der Grund für die breite Streuung liegt in den in Ruhe physiologisch auftretenden Sinusarrhythmien (meist respiratorisch bedingt), die bei jedem Pferd mit unterschiedlicher Häufigkeit auftreten. Bei Belastung verschwinden diese Arrhythmien (Verter and Dietz, 1999). Ein Vergleich der in der vorliegenden Studie erfaßten Parameter mit Daten in der Literatur ist insofern schwierig, da Messungen häufig über unterschiedlich lange Zeiträume durchgeführt werden (bis hin zu 24h), wodurch die Varianz der Meßreihen in einem gewissen Maß beeinflußt wird (Bowen, 1999).

Der von uns ermittelte durchschnittliche SDNN-Ruhewert aller Pferde (341.37 ± 84.01 ms) ist sowohl höher als der von Malik (1996) für Menschen (141 ± 139 ms) als auch der von Bowen (1999) für Pferde (158 ± 70 ms) gemessene. Der signifikante Unterschied zwischen Ruhe und Belastung bestätigt die Ergebnisse von Breuer et al. (1992), die bei Patienten auch eine deutliche Abnahme der SDNN bei Belastung feststellten. Ebenso zeigte sich in ihrer Untersuchung, daß mit Zunahme der Belastung die Schwankungen der IBIs noch weiter abnahmen. Ähnliche Verhältnisse zeigen sich infolge der von uns gewählten verschiedenen Leistungsanforderungen. Innerhalb der verschiedenen Belastungsstufen ist bei der SDNN, wie bei den IBIs, eine tendenzielle, zum Teil sogar signifikante Abnahme der SDNN beim Vergleich der leichteren (ST) mit den anstrengenderen (TK, TE) Testbedingungen auffallend. Es zeichnet sich hier ab, daß im Trab-Trocken-Versuch tendenziell (kein signifikanter Unterschied) größere Schwankungen auftreten als während der vier Versuche im Wasser (SK, SE, TK, TE). Der Wasserwiderstand bedeutet demzufolge also nicht nur in der gleichen Gangart eine zusätzliche Beeinflussung, sondern auch bei einer langsameren Geschwindigkeit tritt eine größere Regelmäßigkeit der Herzfrequenz auf als bei einer schnelleren ohne Wasser.

Zusammenfassend kann man also sagen, daß sowohl körperliche Belastung an sich, als auch eine Intensitätssteigerung durch Geschwindigkeit oder Wasserstand zu einer Verringerung der Varianz der NN-Intervalle und somit auch zu einer Abnahme der HRV führt.

5.2.4. SDANN

Die Berechnung der SDANN, der Standardabweichung der Mittelwerte aller NN-Intervalle für jeweils fünf Minuten lange Abschnitte (Malik, 1996), ergibt deutliche Unterschiede zwischen dem Ruhewert und den Belastungswerten. Infolge der Belastung kommt es zu einer signifikanten Verringerung der langfristigen Schwankungen der Herzfrequenz, also der Schwankungen mit einer länger als 5 Minuten betragenden Periodendauer (Meesmann et al., 1995).

Ähnlich wie bei der SDNN nimmt der TT-Versuch eine Sonderposition ein, da er tendenziell (nicht signifikant) oberhalb der Schrittversuche liegt. Dies bedeutet also, daß auch hier wieder während der Schrittversuche im Wasser, wenn auch nur

tendenziell relativ gering, weniger Variabilität auftritt als in einer schnelleren Gangart ohne Wasser. Ein physiologischer Grund für die höhere SDANN während des Trab-Trocken-Versuches im Vergleich zum Schritt-Trocken-Versuch kann nicht ermittelt werden.

Für die SDANN sind in der Literatur nur relativ wenig Vergleichsangaben zu finden. Für den Menschen wird eine SDANN von 127 ± 35 ms in Ruhe als Normalwert angegeben (Malik, 1996). Der von uns ermittelte SDANN-Ruhewert liegt mit 105.48 ± 26.69 ms in einem ähnlichen Bereich, jedoch etwas niedriger.

5.2.5. RMSSD

Auch bei der Standardabweichung der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle (Meesmann et al., 1995) ergibt ein Vergleich der Ruhe- und Belastungswerte ein ähnliches Bild. Hier werden besonders kurzfristige (hochfrequente) Schwankungen erfaßt (Malik, 1996). Es zeigt sich, daß diese, wie auch die langfristigen Schwankungen (SDANN), bei Belastung signifikant geringer sind als in Ruhe. Anders ausgedrückt heißt dies, daß die Größen der Differenzen aufeinanderfolgender Intervalle weniger um einen Mittelwert schwanken als in Ruhe. Auch hier sind, wie bei der SDNN, die in Ruhe unterschiedlich häufig auftretenden Sinusarrhythmien Ursache der breiten Streuung der Ruhewerte. Auch Breuer et al. (1992) fanden eine deutliche Abnahme der RMSSD infolge körperlicher Betätigung in ihrer Untersuchung. Zusätzlich konnten sie aufzeigen, daß bei einer Zunahme des Belastungsgrades die RMSSD weiter sank. Auch in unserer Untersuchungsreihe zeichnet sich der Trend ab, daß die Belastungen im Trab geringere Schwankungen benachbarter NN-Intervalle bewirken (niedrigere RMSSD) als die im Schritt. Normalwerte für den Menschen in Ruhe werden von Malik (1996) mit 27 ± 12 ms angegeben. Bei einem gesunden Vollblüter maß Bowen (1999) eine RMSSD von 3520 ms. Diese Werte können durch unsere Untersuchung nicht bestätigt werden. Mit 154.70 ± 80.11 ms liegt die durchschnittliche RMSSD der Pferde in Ruhe deutlich unter der von Bowen (1999).

5.2.6. HRV tr Index

Die in der Task Force (Malik, 1996) festgelegte geometrische Berechnungsmethode des HRV tr Index, bei der die Anzahl der verschiedenen NN-Intervalle durch das Maximum der Dichteverteilung dividiert wird, hat zum Vorteil, daß zufällige, kurzfristige Schwankungen („Ausreißer“) nicht so sehr ins Gewicht fallen. So beeinflusst z.B. das Auftreten von Sinusarrhythmien (besonders lange Intervalle) oder ein plötzliches Ansteigen der Herzfrequenz infolge psychischer Erregung (besonders kurze Intervalle), die bei der SDNN doch deutlich ins Gewicht fallen, weniger den HRV tr Index. Die Ergebnisse in Ruhe verdeutlichen dies. Beim HRV tr Index ist eine geringere Schwankungsbreite als bei der SDNN zu verzeichnen. Auffällig ist hierbei das Ergebnis von Pf.6. Aufgrund der bei diesem Pferd besonders häufig auftretenden Sinusarrhythmien (sozusagen „Ausreißer“ aus der „normalen“ Herzfrequenz) liegt die SDNN in Ruhe deutlich über der der übrigen Pferde. Beim HRV tr Index weist Pf.6 hingegen Werte auf, die eher denen der anderen gleichen.

Alle sechs Belastungen haben eine signifikante Abnahme des HRV tr Index im Vergleich zum Ruhewert zur Folge. Zusätzlich ist es mit Hilfe des HRV tr Index auch möglich, die zuvor tendenziellen Unterschiede zwischen den verschiedenen Belastungen bei der SDNN nun als signifikant zu beweisen. Die Ergebnisse zeigen, daß sowohl die beiden Schrittversuche im Wasser (SK, SE) als auch die drei Trabversuche (TT, TK, TE) signifikant geringere Schwankungen der RR-Intervalle zur Folge haben als der Schritt-Trocken-Versuch (ST). Außerdem grenzen sich die beiden Trabversuche im Wasser (TK und TE) zusätzlich noch von den Schrittversuchen im Wasser und dem Traben auf trockenem Laufband ab, da sie nochmals signifikant geringere Werte aufweisen als diese. Der auffällig hohe HRV tr Index des Pf. 7 während des Trab-Trocken-Versuches kann als Ausnahme betrachtet werden, da die Ergebnisse während der anderen Versuche mit denen der übrigen Pferde übereinstimmen. Der Grund für diesen relativ hohen TT-Wert konnte nicht ermittelt werden.

Beim Vergleich mit den Literaturangaben liegt der in unserer Untersuchung unter Ruhebedingungen gemessene durchschnittliche HRV tr Index (32.55 ± 5.19) nur gering unter dem von Malik (1996) für den Menschen (37 ± 15) und dem von Bowen (1999) für Pferde (37 ± 7) ermittelten.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß anhand der Zeitbereichsparameter folgende Feststellungen über die HRV getroffen werden können:

- a) alle sechs gewählten Leistungsanforderungen führen zu einer signifikanten Abnahme der HRV im Vergleich zur Ruhe.
- b) es zeigt sich, daß eine Zunahme der Belastungsintensität zum einen durch das Wasser und die Wasserhöhe und zum anderen durch die Geschwindigkeit zu einer tendenziellen, zum Teil sogar signifikanten Abnahme der HRV führt. Diese Befunde stimmen mit denen von Thayer et al. (1997b) überein, die auch eine Abnahme der HRV bei steigender Belastung fanden.
- c) bei den Parametern SDNN und SDANN ist für den TT-Versuch tendenziell eine etwas größere Variabilität zu verzeichnen als für SK und SE.
- d) anhand des HRV tr Index, dem Parameter, der am wenigsten von Ausreißern beeinflusst wird, wird deutlich, daß Trab im karpalgelenks- und ellenbogenhohen Wasser die Versuche mit der größten Gleichmäßigkeit der RR-Intervalle, also der geringsten HRV sind.
- e) Sinusarrhythmien beeinflussen auffallend die Variabilität der Herzfrequenz in Ruhe.

5.3. Frequenzbereichsparameter der HRV

Eine weitere Charakterisierung der linearen Dynamik der HRV ist über die Berechnung der Frequenzbereichsparameter mit Hilfe der „Power Spectral Density Analyse“ möglich. Hierbei kann anhand der Frequenzen beurteilt werden wie groß die Varianz (Power) einer Meßreihe ist und wie sich diese verteilt (Malik, 1996).

5.3.1. Integral TP

Mit Hilfe der Fourieranalyse wird die zeitliche Abfolge der NN-Intervalle als gewichtete Summe harmonischer Sinusschwingungen in ihrer unterschiedlichen Frequenz dargestellt (Brüggemann et al., 1995). Die TP spiegelt dabei die Gesamtvarianz der NN-Intervalle, also die Größe der gesamten Power wider (Malik, 1996). Sie repräsentiert demzufolge die Summe der Intensitäten aller Einzelschwingungen. Je größer die Schwankungsbreite (Ausschlag nach oben und nach unten) der Sinusschwingungen ist, d.h. in welchen Grenzen die IBIs (und übertragen auch die Herzfrequenz) schwanken, um so höher wird die Power (Intensität) der einzelnen Frequenzbereiche ausfallen. Bewegen sich die IBIs z.B. in kleineren Grenzen, d.h. die Sinusschwingungen sind flacher, dann wird die TP kleiner werden und umgekehrt. Sie ist also letztendlich ein Maß für die Grenzen innerhalb derer sich die Herzfrequenz infolge gesteuerter Prozesse bewegt.

Die Analyse unserer Ergebnisse zeigt, daß die TP bei allen Versuchsstufen, mit Ausnahme von ST, annähernd gleich ist. Den signifikanten Unterschieden und den hohen Werten der Schrittvorsuche kann keine physiologische Ursache zugeordnet werden.

Kombiniert mit den Ergebnissen der IBIs bzw. der Herzfrequenz bedeuten die TP-Werte, daß die Sinusschwingungen bei Belastung zwar auf einem höheren Niveau liegen (erkennbar an den kürzeren IBIs bzw. der gestiegenen HR), die Schwankungsbreite jedoch nahezu gleich groß bleibt (TP annähernd gleich). Unsere Untersuchung zeigt also, daß die Herzfrequenz zwar wie erwartet infolge der Belastungen signifikant ansteigt, die Grenzen innerhalb derer sie schwankt aber praktisch gleich bleiben.

Die relativ hohe TP und deren große Streubreite während des Schritt-Trocken-Versuches ist z.T. Folge des hohen TP-Wertes von Pf.2. Die Ursache ist wahrscheinlich das mehrmalige Stehenbleiben des Pferdes während dieses Versuchs infolge Erschreckens vor dem rotierenden Laufband. Dieses Ereignis führte im EKG zu einigen besonders hohen Anstiegen der Herzfrequenz (besonders kurze IBIs), damit auch zu einer größeren Schwankungsbreite der Schwingungen und insgesamt zu einer größeren Streuung der Werte bei ST. Während der folgenden Versuche traten diese Probleme nicht mehr auf und dieser TP-Wert stellt somit eine Ausnahme in der Versuchsreihe dar.

Die von uns ermittelten TP-Werte für Pferde liegen deutlich über den von Malliani et al. (1994) für den Menschen (2000 ms^2 bzw. 633 ms^2) gemessenen. Die bei Hunden in Ruhe ermittelte TP ist mit $58237 \pm 17754 \text{ ms}^2$ (Pagani et al., 1986) viel höher als die der Pferde, während die TP, die bei den Hunden nach Nitroglyceringabe zur Stimulierung des Sympathikus gemessen wurde ($7513 \pm 3941 \text{ ms}^2$), eher mit unseren Ergebnissen übereinstimmt. Bei Veränderung der Körperhaltung (Malliani et al., 1994) bzw. bei Steigerung der sympathischen Aktivität (Pagani et al., 1986) war in diesen Untersuchungen also eine Abnahme der TP zu verzeichnen.

Ein Vergleich der SDNN und der TP, die beide ihrerseits die Gesamtvarianz bzw. -intensität der Meßreihe widerspiegeln (Bowen, 1999) zeigt, daß bei der SDNN die in Ruhe bei den einzelnen Pferden unterschiedlich häufig auftretenden Sinusarrhythmien (sehr lange IBIs), sozusagen also ein Zufallsprodukt, eine deutliche Erhöhung der Varianz in Ruhe bewirken (große Streubreite der SDNN bei RR). Auf die TP nehmen diese zufälligen Schwankungen jedoch keinen besonders großen Einfluß (kleine Streubreite der TP). Im Gegensatz dazu bewirken kurzzeitige HR-Erhöhungen (sehr kurze IBIs) wie im ST-Versuch bei Pf.2, eine auffällige Zunahme der TP, jedoch keine besondere Modifikation der SDNN, da sehr kurze IBIs nicht die Schwankungsbreite der IBIs um einen Mittelwert erhöhen.

Zusammenfassend kann man somit sagen, daß die Schwankungsbreite der Sinusschwingungen, also die harmonischen Komponenten der HRV, unabhängig vom Belastungsgrad in ihrer Summe immer nahezu gleich bleiben. Eine Beurteilung hinsichtlich der Verteilung der Varianz in den einzelnen Frequenzspektren ist anhand der TP jedoch nicht möglich.

5.3.2. LF_{NORM} , HF_{NORM} und LF/HF ratio

Innerhalb des HF-Bereiches spiegeln sich sowohl vagale als auch respiratorische Einflüsse wider (Akselrod et al., 1981). Beim Menschen liegen die Frequenzen der Atmung in einem Bereich über 0.15 Hz (Saul, 1990). Fluktuationen im HF-Bereich sind Ausdruck der respiratorischen Beeinflussung der vagalen Aktivität (Hirsch and Bishop, 1981; Saul, 1990), wobei die auf den Herzrhythmus wirkenden vagalen Einflüsse (Verlangsamungen des Sinus-Atrial-Knotens) sich in der Variabilität der Herzfrequenz als Sinusarrhythmien widerspiegeln (Bowen, 1999). Durch diese Interaktionen treten synchrone Veränderungen der Atmung und der RR-Intervalle auf, erkennbar daran, daß sich die RR-Intervalle während der Inspiration verkürzen und während der Expiration wieder verlängern (Matsui and Sugano, 1989). Diese Sinusarrhythmien sind physiologische Schwankungen der Herzfrequenz, die bei Belastungen verschwinden (Verter and Dietz, 1999). Beim Menschen werden sie auch als Respiratorische Sinusarrhythmien (RSA) bezeichnet (Hirsch and Bishop, 1981).

Um die von der Task Force (Malik, 1996) für den Menschen festgesetzten Grenzen der beiden Frequenzbereichsparameter LF und HF auf das Pferd übertragen zu können, mußten die Grenzen des HF-Bereiches entsprechend verschoben werden. Da die Atemfrequenz des Pferdes in Ruhe zwischen 8-16 Atemzügen pro Minute liegt, also in einem Frequenzbereich zwischen 0.133 Hz und 0.266 Hz, wurde die untere Grenze des HF-Bereichs auf >0.116 Hz nach unten korrigiert, so daß die respiratorischen Frequenzen sicher mit erfaßt wurden. Kuwahara et al. (1996) fanden beim Pferd die höchste Übereinstimmung zwischen HR und respiratorischer Variabilität bei 0.12 Hz.

Über die Bedeutung der LF-Komponente, in deren Grenzen auch die Frequenzen des Blutdruckes und des peripheren Gefäßwiderstandes zu finden sind (Akselrod et al., 1981; Kuwahara et al., 1996), bestehen in der Literatur unterschiedliche Meinungen. Während Akselrod et al. (1981) und Pomeranz et al. (1985) sowohl dem Sympathikus als auch dem Parasympathikus eine gleiche Beteiligung an der Entstehung der LF-Komponente zuschreiben, haben andere Untersuchungen gezeigt, daß die LF-Frequenzen überwiegend Ausdruck sympathischer Einflüsse auf

die Herzfrequenz sind (Lombardi et al., 1996; Malliani et al., 1991; Montano et al., 1994; Pagani et al., 1986). Diese unterschiedlichen Einschätzungen sind laut Malik (1996) Folge der unterschiedlichen Aussagekraft der absoluten (Integral LF bzw. Integral HF [ms^2]) und der relativen (LF_{NORM} bzw. HF_{NORM} [%]) Werte der LF- und HF-Power. Anhand der normierten Werte ist eine bessere Beurteilung der tatsächlichen Veränderungen der LF- und HF-Power bei Modifikationen der Ausgangsbedingungen wie z.B. bei veränderter Körperhaltung oder körperlicher Belastung möglich (Malik, 1996; Pagani et al., 1993). Interindividuelle Unterschiede werden hierdurch minimiert (Pagani et al., 1986).

In unserer Untersuchung zeigt sich, daß es infolge der gewählten Belastungen bei relativ gleichbleibender TP zu einem signifikanten Wechsel des Einflusses der beiden Äste des autonomen Nervensystems kommt. Während aller Belastungstests ist ein deutlich höherer Sympathikotonus (signifikant höhere LF_{NORM}) und ein im gleichen Maße geringerer Parasympathikotonus (signifikant niedrigere HF_{NORM}) im Vergleich zum Ruhewert zu verzeichnen.

Infolge der Verschiebung des Verhältnisses zwischen Sympathikus und Parasympathikus zeigt auch die LF/HF ratio, der Gradmesser sympatho-vagalen-Balance (Malik, 1996; Malliani et al., 1994), einen signifikanten Anstieg während der sechs Belastungstests.

In der Literatur sind für das Pferd noch keine einheitlichen Vergleichswerte verfügbar. Nach Umrechnung in normalisierte Einheiten stimmen die von Kuwahara et al. (1996) (LF_{NORM} : 72.38%, HF_{NORM} : 27.62% und LF/HF ratio: 2.62) für das Pferd in Ruhe ermittelten Werte besser mit unseren Ergebnissen überein als die von Bowen (1999) (LF_{NORM} : 86.56%, HF_{NORM} : 13.44% und LF/HF ratio: 6.44) unter Ruhebedingungen gemessenen, die eher unseren Belastungswerten gleichen.

Entsprechend unserer Untersuchung fanden auch Nakamura et al. (1993) und Warren et al. (1997) einen belastungsinduzierten Anstieg der sympathischen und eine Abnahme der parasympathischen Parameter. Auch psychischer Stress kann laut Malliani et al. (1994) einen Anstieg der LF-Power bewirken. In ihrer Untersuchung zeigte sich, daß immer wenn sich die sympatho-vagale Balance zugunsten einer sympathischen Dominanz verschob, auch eine Abnahme der HF-Komponente zu verzeichnen war. In Ruhe überwiegt die HF-Komponente

(Parasympathikotonus) und nach Belastungen steigt sie mit abnehmender physischer Aktivität wieder an (Thayer et al., 1997b; Thayer et al., 1997a).

Pagani et al. (1986) erhielten für den Menschen beim Vergleich von Ruhebedingungen (LF_{NORM} : $62.2 \pm 6.3\%$, HF_{NORM} : $26.3 \pm 4.3\%$ und LF/HF ratio: 2.37 ± 1.23) und aufrechtem passivem Stehen (90°) eine höhere LF_{NORM} ($83.7\% \pm 4.6$) und LF/HF ratio (7.34 ± 3.19) und eine niedrigere HF_{NORM} ($11.4 \pm 2.8\%$). Wenn man die von Yamamoto et al. (1991) ermittelten absoluten Werte der LF- und HF-Power in Relativwerte umrechnet und daraus die LF/HF ratio bestimmt, zeigt sich wie in unserer Untersuchung, daß es auch bei den untersuchten Menschen ausgehend von den Ruhewerten (LF_{NORM} : 35.08% , HF_{NORM} : 64.92% und LF/HF ratio: 0.54) zu einer Abnahme der HF_{NORM} (15.99%) und zu einer deutlichen Steigerung der LF_{NORM} (84.01%) und der LF/HF ratio (5.25) infolge der höchsten Belastungsstufe kam.

Der jeweils feststellbare signifikante Unterschied zwischen ST und TT bei der LF_{NORM} und der HF_{NORM} bzw. zwischen TT und ST, SK sowie TK bei der LF/HF ratio in unserer Testreihe kann wie von Malliani et al. (1994) beschrieben, Folge der größeren Aufregung bzw. psychischen Belastung während des Trab-Trocken-Versuches sein. An diese Versuchstagen war aufgrund der hohen Geschwindigkeit auf dem trockenen Laufband der Geräuschpegel im Vergleich zu den anderen Versuchstagen viel höher, wodurch die Pferde offenbar stärker gestreßt wurden.

Bei der LF_{NORM} und der HF_{NORM} weichen die Werte von Pf.2 während des Trab-Trocken-Versuches deutlich von denen der anderen Versuche und denen der anderen Pferde ab. Es stellte sich dadurch die Frage, ob dies eine Folge ungünstig gewählter Grenzen ist oder ob dieses Pferd einen außergewöhnlich niedrigen Sympathiko- bzw. hohen Parasympathikotonus (zum Beispiel infolge einer besonders ausgeprägten Entspannung während dieses Versuches) aufwies. Eine genaue Betrachtung der zugehörigen Frequenzspektren zeigt jedoch, daß diese Abweichung aufgrund der gewählten Grenze zwischen dem LF- und HF-Bereich zustande kommt. Eine Verschiebung der Grenze von >0.116 Hz zu dem von Malik (1996) angegebenen von >0.15 Hz würde zu einer LF_{NORM} von 72.2% anstatt von zuvor 68.2% und zu einer HF_{NORM} von 27.8% anstatt 31.7% führen, womit dieser Wert näher an den übrigen liegen würde. Aber aufgrund der Tatsache, daß nur dieses eine Pferd in einem der Versuche hiervon betroffen ist, wird aus Gründen der

Einheitlichkeit die Grenze von >0.116 Hz beibehalten. Da eine Verschiebung der Grenze die exponierte Lage von Pf.2 im TT-Versuch verhindern würde, kann ausgeschlossen werden, daß die abweichenden Werte auf einen veränderten Sympathiko- oder Parasympathikotonus zurückzuführen sind.

Mit Hilfe der Frequenzbereichsparameter können also folgende Aussagen getroffen werden:

a) die harmonischen Komponenten der Herzfrequenz schwanken bzw. die Herzfrequenz schwankt, trotz eines signifikanten Anstieges der Herzfrequenz infolge der Belastungen, unabhängig vom Belastungsgrad immer in annähernd gleichen Grenzen.

b) anhand der LF_{NORM} , HF_{NORM} und LF/HF ratio läßt sich beweisen, daß die geforderten Belastungen zu einer signifikanten Verschiebung des Verhältnisses zwischen Sympathikus und Parasympathikus infolge der signifikanten Zunahme der sympathischen und der signifikanten Abnahme der parasympathischen Einflüsse auf das Herz führt.

5.4. Recurrence plot Parameter

5.4.1. % recurrence und % determinism

Die recurrence plot Berechnung dient der Analyse der nicht-linearen Komponenten der HRV. Auffällige Ergebnisse zeigt ein Vergleich der %rec in Ruhe mit der anstrengendsten Belastung (TE), bei dem die %rec, also der Prozentsatz des Diagrammes, der mit wiederkehrenden Punkten (recurrent points) besetzt ist (quantitatives Maß) (Webber and Zbilut, 1994), infolge der Belastung sogar signifikant abnimmt (tendenziell fällt die %rec auch beim Vergleich von RR zu TK). Dies bedeutet, daß sich die Beziehung zwischen den an der Meßreihe beteiligten 10 Variablen verändert. Nun kann eine Abnahme der %rec zwei Ursachen haben. Sie kann zum einen infolge eines größeren Zufallseinflusses absinken, der bewirkt, daß weniger der Vektoren im 10-dimensionalen Raum in einem bestimmten Radius (cut off-Wert) eng nebeneinander liegen und dadurch weniger recurrence points entstehen. Zweitens führen stärkere deterministische Strukturen zu einer stärkeren Ausrichtung der Vektoren, d.h. immer mehr Vektoren liegen auf den gleichen Punkten (recurrent point auf recurrent point), so daß letztendlich auch hier weniger Punkte auftreten.

Die Analyse der %det (qualitatives Maß) zeigt, daß sich aber auch die Anordnung der recurrent points infolge der Belastungen verändert. Die %det steigt bei allen sechs Tests signifikant an, das heißt, es sind mehr der vorhandenen recurrent points in diagonalen Linien angeordnet (Webber and Zbilut, 1994) als in Ruhe. Mit anderen Worten, eine Vergrößerung der %det bei gleichbleibender bzw. geringerer %rec bedeutet, daß die Punkte weniger ein Produkt des Zufalls sind, sondern vielmehr als Folge geordneter (gesetzmäßiger bzw. deterministischer) Strukturen auftreten. Die Herzfrequenz ist während der Belastung also ein stärker geordneter bzw. organisierter Prozeß als in Ruhe.

5.4.2. $\text{ratio}_{\text{KORR}}$

Die Berechnung der $\text{ratio}_{\text{KORR}}$ (Verhältniss der %det zur %rec) spiegelt die Veränderungen nochmals deutlich wider. Die geforderten Belastungen führen zu einer Zunahme der Stabilität bzw. Stationarität der Herzfrequenz (oder HRV), dadurch daß die Anzahl der recurrent points (%rec), zumindest tendenziell bei TK und bei TE sogar signifikant, abnimmt, und diese sich dabei bei allen Belastungen vermehrt (signifikant) in diagonalen Linien anordnen (%det). Zusätzlich lassen die tendenziellen, teilweise aber auch signifikanten Unterschiede der $\text{ratio}_{\text{KORR}}$ zwischen leichteren (Schritt) und anstrengenderen Belastungen (TK und TE) auch den Schluß zu, daß es mit Zunahme der Belastung zu einer ausgeprägteren Stabilisierung des physiologischen Systems kommt.

5.4.3. $\text{entropy}_{\text{KORR}}$

Dieser Parameter, der auch zur Charakterisierung dynamischer, nicht-linearer Prozesse beiträgt, beschreibt die Komplexität eines Systems. Dies bedeutet mit anderen Worten, nimmt die Anzahl unterschiedlich langer diagonalen Linien und hier besonders die der längeren Linien zu, so nimmt die Breite der Verteilung der Linien im Histogramm und somit auch der Faktor E, der diese Verteilung beschreibt, zu. Je größer der Faktor E, um so komplexer ist die deterministische Struktur des Systems (Webber and Zbilut, 1994).

In unserer Untersuchung können wir zeigen, daß infolge der Belastungen der Ordnungsgrad nicht nur durch die Zunahme der Anzahl diagonalen Linien (Zunahme %det) steigt, sondern daß er auch durch ein breiter gefächertes Linienbild mit einem vermehrten Auftreten längerer Linien (mehr Punkte sind an einer Linienbildung beteiligt) komplexer wird. Die signifikant höheren $\text{entropy}_{\text{KORR}}$ -Werte infolge der Belastungen bedeuten also, daß die nicht-lineare Dynamik der HRV bei Belastung im Vergleich zur Ruhe stärker deterministischen d.h. gesetzmäßigen Regelungen unterliegt und somit der Zufall an ihrer Entstehung weniger beteiligt ist.

Zwischen den einzelnen Belastungen sind zwar auch einige signifikante Unterschiede zu finden, jedoch ist es nicht möglich, vielleicht auch durch die

niedrigen Ausgangszahlen der Untersuchung (7 Pferde) bedingt, eine Aussage über die physiologische Bedeutung dieser Unterschiede für die unterschiedlichen Belastungen zu treffen.

Anhand der recurrence plot Parameter zeigt sich:

a) durch stärkere deterministische Strukturen in der Meßreihe führen die anstrengenderen Belastungen (TE, tendenziell auch TK) zu einer Abnahme der %rec, dadurch daß immer mehr der von zwei eng nebeneinander liegenden Vektoren gebildeten recurrence points auf der gleichen Stelle liegen.

b) bei körperlicher Belastung ordnen sich mehr der recurrence points in diagonalen Linien an (%det steigt), die anzeigen, daß die deterministische Dynamik der Herzfrequenz zunimmt.

c) infolge von a) und b) nimmt die Stabilität der HRV ($\text{ratio}_{\text{KORR}}$) bei Belastung signifikant zu; aber auch innerhalb der Belastungen zeigt sich eine zunehmende Stabilisierung beim Vergleich der leichteren Belastungen mit den schwereren. Je anstrengender die Belastung, um so ausgeprägter die Stabilität.

d) infolge der Belastungen treten immer häufiger längere Linien auf, so daß auch die Komplexität der HRV signifikant zunimmt.

Zusammenfassend kann man also sagen, daß es infolge der Belastungen zu einer Zunahme der deterministischen Strukturen in der nicht-lineare Dynamik der HRV kommt und zufällige Schwankungen weniger Einfluß an ihrer Entstehung haben.