

4 DISKUSSION

4.1 Methodendiskussion

4.1.1 EKG-Datenerfassung

Die Aufzeichnung des EKG mit Hilfe des Elektrodengurtes war teilweise etwas problematisch. Bei einigen Pferden war die Akzeptanz des Gurtes nicht immer von vorneherein gegeben. Eine angemessene Adaptationszeit ist bei der Auswertung der EKG-Meßreihe berücksichtigt worden. Der Elektrodenkontakt zum Tierkörper wurde mittels Elektrodengel optimiert. Bei heftigen Bewegungen des Tieres durch Aufregung, nahende Fütterungszeit, oder Erschrecken des Tieres war trotz des Elektrodengels der vollständige Körperkontakt nicht immer gewährleistet. Somit waren im EKG bei der Auswertung oftmals Bewegungsartefakte zu sehen, die manuell mittels des Programmes Multidat V.4 interpoliert werden mußten. Durch diese manuelle Fehlerbeseitigung kann es zu einer subjektiven Verfälschung der Inter-Beat-Intervall-Reihe gekommen sein. Den NN-Intervallen könnten somit Zeitintervalle zugeordnet worden sein, die an der jeweiligen Korrekturstelle in dieser Form nicht plaziert gewesen wären. Um der Entstehung von solchen Artefakten durch Bewegung des Pferdes vorzubeugen, wäre die Handhabung von Nadelelektroden, die subcutan am Tier angelegt werden, vielleicht von Vorteil gewesen. Mit dieser Methode haben heftige Bewegungen des Tieres sicherlich nicht so einen hohen Einfluß auf die Zeitreihe der Inter-Beat-Intervalle, bzw. führen nicht zu einer großen Anzahl von Bewegungsartefakten.

4.1.2 Analyseparameter

4.1.2.1 Zeitbereichs-Parameter

Die Analyse im Zeitbereich erstreckt sich hauptsächlich auf eine beschreibende Statistik der Momentanherzfrequenz oder der RR-Intervalle und deren Differenzen (z. B. Standardabweichung (SDNN)). Diese Art der Analyse kann längst nicht die

vollen Informationen liefern, die im Signal enthalten sind. Der Gebrauch der Zeitbereichs-Parameter setzt unter anderem Verteilungen zumindest ähnlich der Normalverteilung voraus, die so bei dem Herzfrequenzvariabilitäts-Signal nicht a priori gegeben ist. Die „Grunddaten“, hier die Inter-Beat-Intervalle, folgten keiner Normalverteilung. Sie waren in ihrer Verteilung linkssteil.

Die Meßgrößen der Zeitbereichsparameter erlauben keine Annahme über die der Messung zugrundeliegenden Prozesse. Daraus ergibt sich ein wesentliches Manko dieser Parameter: sie können nicht zwischen zufallsbedingten Veränderungen und geregelten Prozessen der Variabilität unterscheiden. Eine Abnahme der Variabilität deutet also nicht zwingend auf eine Änderung der Systemfunktion hin, sondern kann auch durch eine Verringerung der zufallsbedingten Schwankungen hervorgerufen sein. Der Einfluß des Zufalls kann bei dieser Methode erheblich sein, so daß sie als alleinige Informationsgröße keine verlässlichen Ergebnisse liefert.

Bei der SDNN geht die zeitliche Abfolge der NN (normal to normal) nicht in die Analyse ein. Deshalb ist die SDNN nur ein grobes Maß zur Charakterisierung der Herzfrequenzvariabilität. Die Standardabweichung steht hier als Maß für die Gesamtvariabilität. Eine große SDNN zeigt eine große Variabilität der Herzfrequenz an. Beim Parameter SDANN ist der mögliche Zufallseinfluß schon geringer, da hier jeweils 5-Minuten-Abschnitte analysiert werden. Die Menge der Daten in der Analyse ist dadurch kleiner (MEESMANN et al., 1995).

4.1.2.2 Frequenzbereichs-Parameter

Mit Hilfe der Transformation aus dem Zeit- in den Frequenzbereich kann man verborgene Periodizitäten in Zeitreihen besser erkennen. Dabei wird die gesamte Variabilität einer Zeitreihe auf die einzelnen Frequenzen des untersuchten Frequenzbereiches aufgeteilt. Der Gesamtvariabilität einer Zeitreihe entspricht bei einer graphischen Darstellung der Analyse im Frequenzbereich die Fläche unter der Kurve (Ordinate: spektrale Leistung; Abszisse: untersuchter Frequenzbereich). Die spektrale Leistung ist ein Maß für die Variabilität der untersuchten Zeitreihe bei der jeweiligen Frequenz oder dem jeweiligen Frequenzbereich (LÖLLGEN, 1999).

Die Schwierigkeit dieses Analyseverfahrens liegt in der Verwendbarkeit der R-R-Intervall-Reihe. Sie erfüllt nicht ohne weiteres die notwendigen Vorbedingungen zur

Spektralanalyse. Es finden sich in der Inter-Beat-Intervall-Reihe keine äquidistanten Zeitabstände, die Wahrscheinlichkeit einer Herzaktion ist nicht zu jeder Zeit gleich (Nichtstationarität), der Sinusrhythmus kann durch Extrasystolen unterbrochen sein und es können Artefakte auftreten (BRÜGGEMANN et al., 1995). In den EKG-Daten der zur Verfügung stehenden Pferde waren z. B. Bewegungsartefakte häufig zu finden. Aus diesen genannten Gründen mußte die Zeitreihe erst aufbereitet werden, damit das spektralanalytische Verfahren durchgeführt werden konnte (Berechnung äquidistanter momentaner Herzfrequenzen).

4.1.2.3 Nicht-lineare Komponenten

Prinzipiell können mit Verfahren des deterministischen Chaos nicht-lineare Eigenschaften der Herzfrequenzvariabilität dargestellt werden. Die Spektralanalyse als ein parametrisches Verfahren der Zeitreihenanalyse bestimmt nur linear Mittelwerte von zufälligen Prozessen in ihren Frequenzen über die Zeit. Die physiologische Interpretation dieser Resultate aus Verfahren zur Beschreibung des deterministischen Chaos ist bisher noch etwas diffizil.

4.1.2.3.1 Recurrence-Plot-Parameter

Das Recurrence-Plot-Verfahren zeichnet sich durch seine Robustheit gegenüber der Nichtstationarität untersuchter Prozesse aus. Im Gegensatz zu den Analyseparametern des Frequenzbereiches, ist es bei diesem Verfahren nicht notwendig, die Zeitreihe aufzuarbeiten (WEBBER und ZBILUT, 1994). Aus diesem Grunde ist das Recurrence-Plot-Verfahren besonders zur Untersuchung physiologischer Meßreihen geeignet. Ein weiterer Pluspunkt dieses Verfahrens ist die Möglichkeit, den Einfluß des Zufalls zu eliminieren. Von den berechneten Parametern der Originalmeßreihe wurde ein Wert abgezogen, der als Mittelwert von insgesamt 10 Zufallsverwürfelungen der Originalmeßreihe errechnet wurde. Durch diese Art der Randomisierung wurde ein möglicher zugrundeliegender geregelter Prozeß zerstört. Mittelwert und Streuung der Werte blieben jedoch erhalten.

4.1.2.3.2 Maximaler Lyapunow-Exponent

Die maximalen Lyapunow-Exponenten der untersuchten Zeitreihen aller Pferde waren ausnahmslos positiv. Dies spricht dafür, daß die Herzfrequenzvariabilität des Pferdes deterministisch-chaotische Eigenschaften besitzt (RIGNEY et al., 1990). Ein positiver Lyapunow-Exponent ist ein Zeichen von Chaos. Eine mögliche mathematische Definition des Chaos ist, daß in einem deterministischen System zumindest einer der Lyapunow-Exponenten größer als Null ist (DENTON, 1990; KAPLAN und GOLDBERGER, 1991). RIGNEY et al. fanden 1990 bei der Untersuchung der Herzfrequenzvariabilität von gesunden Versuchspersonen ebenfalls generell positive Lyapunow-Exponenten und sahen dies als einen Hinweis auf das Vorhandensein einer chaotischen Steuerung der Herzfrequenz beim Menschen.

Voraussetzung zur Ermittlung des maximalen Lyapunow-Exponenten ist allerdings eine lange stationäre Zeitreihe, die im Idealfall unendlich lang ist, damit genügend Datenpunkte enthalten sind (DENTON et al., 1990). Andererseits ist die Praktikabilität dieser Forderung bei der Untersuchung biologischer Zeitreihen zu beachten. Wie auch schon bei den Parametern des Frequenzbereiches angeführt, ist bei den Inter-Beat-Intervallen mit einer nichtstationären Zeitreihe zu rechnen, da die Wahrscheinlichkeit der Herzaktion nicht zu jeder Zeit gleich ist.

Der hier berechnete positive Lyapunow-Exponent kann deshalb nur als ein Hinweis auf das Vorhandensein einer deterministisch-chaotischen Komponente in den untersuchten Zeitreihen gewertet werden.

4.2 Ergebnisdiskussion

4.2.1 Pferde der Gruppe II: Chronisch obstruktive Bronchitiker

Bei den meisten Pferden dieser Gruppe konnten die Leitsymptome der chronisch obstruktiven Bronchitis bei der EKG-Aufzeichnung vorausgegangenen Untersuchung klinisch festgestellt werden. Leitsymptome beim Pferd sind Nasenausfluß, der durch entzündliche Exsudation, Hyperkrinie und Dyskrinie ausgelöst und durch den Husten nach außen befördert wird. Auch Atemnot durch Bronchospasmus, Mukostase und Vergößerung der alveolokapillären Strecke sowie Husten infolge Schleimhautschwellung und entzündlicher Exsudation gehören zum Gesamtbild dieser Erkrankung. Diese Erkrankung führte bei den betroffenen Pferden zu einer allgemein geschwächten Herz- und Kreislauftsituation. Durch die Anwendung des Acetylcysteins, das in der Humanmedizin schon lange erfolgreich eingesetzt wird, soll dem Pferd das Abhusten des Sekretes erleichtert werden. ACC wirkt sekretolytisch und hebt somit die Mukostase auf. Durch die dadurch gesteigerte Atmungsfähigkeit und das höhere O₂-Angebot soll sich die Herz- und Kreislauftsituation des Pferdes und dessen Allgemeinbefinden verbessern.

Die Aussagekraft der verschiedenen Analyseparameter der Herzfrequenzvariabilität soll aufgrund dieser Tatsache geprüft werden. Ist eine Unterscheidung der Referenzgruppe mit den kranken Tieren möglich? Ist die allmähliche Verbesserung des Krankheitszustandes der Pferde, denen das Medikament verabreicht wurde, anhand der Analyseparameter darzustellen?

4.2.1.1 Inter-Beat-Intervall- und Herzfrequenz-Daten

Die IBI-Werte und die sich daraus ergebenden Herzfrequenz-Daten sind in den **Abb. 2** und **3** dargestellt. Die Inter-Beat-Intervalle bewegen sich im Median zwischen 1686 ms bei der Referenzgruppe bis zu 1833 ms in der 1. Woche der Behandlung. Dies entspricht einer Herzfrequenz von 35.4 bpm bei der Referenzgruppe und 31.2 bpm bei der Gruppe der kranken Pferde.

Das Pferd hat in Ruhe eine durchschnittliche rasseabhängige Ruheherzfrequenz von ca. 32 bis 40 Schlägen in der Minute (KOLB, 1989). Die Herzfrequenz bei beiden Pferdegruppen ist also als normal einzustufen. Anhand der Inter-Beat-Intervall-Längen und der dazugehörigen Herzfrequenzen läßt sich kein Unterschied zwischen gesunden und kranken Pferden feststellen, da sich alle Werte im Normalbereich befinden.

4.2.1.2 Zeitbereichs-Parameter

Die Zeitbereichs-Parameter zeigen bei allen untersuchten Größen der kurz- und längerfristigen Variabilität einen mehr oder weniger einheitlichen Verlauf. Er deutet die Abnahme der Variabilität im Verlauf der Behandlung an. Die behandelten Tiere nähern sich dem Wert der Kontrollgruppe. In der 1. Woche ist bei allen Parametern die weite Spanne zwischen dem kleinsten und dem größten Wert auffallend. Wie die **Abb. 4** bis **5** zeigen, streuen die Werte dort stark. Auffallend ist, daß sich bei der SDNN und der RMSSD ein Pferd, das Placebo erhielt, gegenläufig zu der Entwicklung der anderen Pferde verhält. Während alle anderen Tiere von der 1. bis zur 2. Behandlungswoche einen kleineren Wert annehmen, vergrößert sich bei diesem Tier der Parameter. Bei allen drei Parametern des Zeitbereiches ist der „Sprung“ der Werte von der 1. auf die 2. Woche deutlich. Die Werte der 1. Woche sind gegenüber der Referenzgruppe und den Wochen 2 und 3 signifikant verschieden. Diese Entwicklung ist, mit Ausnahme des schon genannten Placebo-Tieres, wohl nicht nur auf einen Therapieerfolg zurückzuführen. Es ist anzunehmen, daß die Adaptation der Tiere an die neue Umgebung, die Haltung unter Klinikbedingungen, maßgeblich für diese Entwicklung verantwortlich ist. Abnahme des mentalen Stresses der Tiere führt zu dieser Entwicklung. Aufgrund der Ergebnisse anderer Arbeitsgruppen aus dem humanmedizinischen Bereich, würde man bei einer Verbesserung des Krankheitszustandes eine Zunahme der Herzfrequenzvariabilität erwarten (KLINGENHEBEN, 1993). In den **Abb. 4** bis **6** ist aber das genaue Gegenteil dieser Entwicklung dargestellt.

Die Parameter des Zeitbereiches unterscheiden nicht zwischen zufallsbedingten Veränderungen der Variabilität und der durch geregelte Prozesse. Die Verringerung

der Herzfrequenzvariabilität muß hier nicht unbedingt auf eine Verschlechterung der Systemfunktion hindeuten. Es kann sich hierbei durchaus um zufallsbedingte Schwankungen handeln, so daß man zu dem Schluß kommt, daß Parameter des Zeitbereiches als alleinige Informationsgröße keine verlässlichen Ergebnisse liefern.

4.2.1.3 Frequenzbereichs-Parameter

Bei den Parametern des Frequenzbereiches in normalisierten Einheiten spielt der Zufall eine weitaus geringere Rolle als bei den Parametern des Zeitbereiches. Mit Hilfe der Spektralanalyse ist es möglich, die Ergebnisse der Parameter des Zeitbereiches zu komplettieren (VYRBAL et al. 1989; MONTANO et al., 1994). Es zeigen sich bei den Parametern des Frequenzbereiches keine signifikanten Unterschiede zwischen kranken und gesunden Pferden. Die behandelten Pferde und die, welchen Placebo verabreicht wurde, zeigen einen einheitlichen Verlauf bei der Änderung der Werte von der 1. bis zur 4. Woche. Die Placebo-Tiere verhalten sich nicht auffallend anders. Die Spannweite der Werte in Woche 1 wird noch übertroffen, von der Spannweite in der 3. Woche. Schaut man sich die Entwicklung der LF-Komponente an (**Abb. 7**), die den Einfluß des Sympathikus charakterisiert, fällt auf, daß sie während der Behandlung im Median stetig ansteigt. Anfangs lag sie unter dem Wert der Referenzgruppe. In der 4. Woche liegt der Median tendenziell über dem der Kontrollgruppe. Daraus ist zu schließen, daß unter der Behandlung mit Acetylcystein der sympathische Einfluß zunimmt. Die HF-Komponente (**Abb. 8**), die den vagalen Einfluß charakterisiert, nimmt während der Behandlung stetig ab. Bei der Ratio aus LF/HF besteht deshalb eine Tendenz zur Zunahme (**Abb. 9**). Die sympathovagale Balance verschiebt sich während der 4 Behandlungswochen zugunsten des Sympathikus. Nach WITTKE und BAYER (1968) und KOLB (1989) ist das Pferd als ausgesprochener Vagotoniker zu bezeichnen. Die durchschnittliche, rasseabhängige Ruhe-Herzfrequenz von 32-40 bpm kann sich unter großer Belastung auf über 200 bpm steigern. Innerhalb der Säugetierspezies ist dies eine außergewöhnliche Spannweite, die sich durch den in Ruhe extrem vorherrschenden Vaguseinfluß erklärt. Da dies so ist, würde man unter der Therapie eigentlich erwarten, daß die HF-Power, die den Vagus-Einfluß charakterisiert, ansteigt und die

LF-Power abnimmt. Hier ist es aber genau umgekehrt. Der Einfluß des Sympathikus nimmt zu, der des Vagus nimmt ab. MONTANO et al. untersuchten 1994 die Änderung der Herzfrequenzvariabilität beim Menschen in bezug zu veränderten Körperpositionen. In horizontaler Lage war der Vaguseinfluß dominierend (hohe HF-Power), in senkrechter, aufrechter Stellung der Einfluß des Sympathikus (hohe LF-Power). Daraus kann man schließen, daß bei angeregter Herz- und Kreislauflage, wie in aufrechter Körperhaltung gegeben, natürlich die LF-Power ansteigt. Durch die Therapie mit ACC hat sich die gesamte Herz- und Kreislauflage bei den Tieren verbessert, sie ist wieder „ansprechbarer“. Die Regelkreise des Pferdes haben durch die Therapie wieder eine gesteigerte Möglichkeit, Einfluß auf die Regelung der Prozesse zuzunehmen. Die dargestellten Werte erlauben es ohne weiteres, die Analyse der Herzfrequenzdaten mittels FOURIER-Transformation, Trennung der erhaltenen Spektren in die für das Pferd modifizierten Frequenzbereiche und Darstellung derselben in normalisierten Einheiten, als gut und verlässlich zu bezeichnen. Leider ist die Zeitreihe der RR-Intervalle kein Signal, welches die Vorbedingungen zur Spektralanalyse ohne weiteres erfüllt (Nichtstationarität der Herzaktion), und erst aufbereitet werden muß.

4.2.1.4 Nicht-lineare Komponenten

4.2.1.4.1 Recurrence-Plot-Parameter

Bei der Größe %recurrence (**Abb. 11**) wird der Prozentsatz des Gesamtplots angegeben, der durch Punkte besetzt ist. Die kranken Pferde zeigen einen einheitlichen Verlauf der Werte. Es besteht bei diesem Parameter ein signifikanter Unterschied zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe der kranken Pferde in der 1. Woche. Der Median der Kontrollgruppe beträgt 0.80 %, der Median der kranken Pferde beträgt in der 1. Woche 12.56 %. Die Werte der %recurrence in der 1. Woche der kranken Pferde lassen annehmen, daß bei diesen Prozessen eine periodische Dynamik vorherrscht. In der 2. Woche nähert sich die Gruppe der kranken Tiere im Wert denen der Kontrollgruppe. Die Dynamik ist aperiodisch. Nach DENTON et al. (1990) ist Chaos beides: deterministisch und aperiodisch. Es ist also davon

auszugehen, daß sich im Ergebnis der %recurrence eine Veränderung des chaotischen Verhaltens widerspiegelt.

Die %determinism unterscheidet zwischen den Punkten, die nur zufällig Recurrence-Punkte sind und denjenigen, die in einer geordneten Struktur vorliegen (**Abb. 12**). Beim durchgeführten Recurrence-Plot ist der Zufall mathematisch eliminiert worden. Zwischen der Referenzgruppe und der Gruppe der kranken Pferde in der 1. Woche besteht ein signifikanter Unterschied. Ein Pferd, das Placebo erhielt (das Gleiche wie bei den Parametern des Zeitbereiches) verhält sich anders, als die anderen Tiere. Im Verlaufe der Behandlung steigt die %determinism im Median an. Daraus läßt sich eine mit der Behandlung einhergehende Straffung der Organisation der biologischen Prozesse folgern. Der Anteil der geordneten Dynamik nimmt zu, so daß sich unter der Therapie die Dynamik der Herzfrequenzvariabilität wieder normalisiert. Sie bewegt sich im Bereich der Kontrollgruppe.

Bei der Ratio %reterminism/%recurrence findet sich ein signifikanter Unterschied zwischen der Kontrollgruppe und den kranken Tieren in der 1. Woche (**Abb. 13**). Durch Bildung des Quotienten werden interindividuelle Unterschiede unterdrückt. Die Ratio ist eine Variable, welche die Stationarität eines Systems beschreibt. Der Ratio-Wert ist immer dann besonders hoch, wenn das System von einem Zustand in einen anderen übergeht. In der 1. Behandlungswoche ist der Wert der Ratio wesentlich niedriger, als der Wert der Referenzgruppe. Der Krankheitszustand schränkt das biologische System Pferd in seinen Möglichkeiten ein. Es bestehen engere Grenzen. Im Verlaufe der Behandlung steigt die Ratio allmählich an. Sowohl die Herz- und Kreislaufsituation als auch das Allgemeinbefinden der Tiere hat sich durch das Medikament erheblich verbessert. Das biologische System Pferd ist wieder leistungsfähiger. Eine höhere Ratio bedeutet mehr Übergänge und damit auch mehr Variabilität.

Die entropy beschreibt im Recurrence-Plot die Komplexität eines Systems (**Abb. 14**). In der 1. Woche der Behandlung ist der Wert der entropy mit 1.81 kleiner als bei der Referenzgruppe, der dort 2.19 beträgt. Kleine entropy-Werte deuten auf eine straffere Organisation des Systems hin. Im Verlauf der Medikamentenapplikation nimmt der Wert der entropy zu. Die deterministische Struktur des Systems wird umfassender. Sie ist aus vielen Einflußgrößen zusammengesetzt, aber bildet doch eine Einheit. Auch in diesem Parameter spiegelt sich die Verbesserung des Allgemeinzustandes der behandelten Pferde wider. Eines der Pferde, die das

Placebo erhielten, bleibt bei niedrigen entropy-Werten im Bereich von 0.27 und 0.39. Es verhält sich nicht so, wie die anderen. Das System dieses Pferdes ist beschränkt in seinen Möglichkeiten.

4.2.1.4.2 Maximaler Lyapunow-Exponent

Die Berechnung des maximalen Lyapunow-Exponenten ist als gute Ergänzung zu den Recurrence-Plot-Parametern anzusehen. Zufallsbedingte Veränderungen können auch hier durch Korrektur eliminiert werden. In multidimensionalen Systemen beschreibt ein Exponent von 0 periodische oder zufällige Zustände, ist der Exponent positiv, indiziert er ein chaotisches System. In der 1. Woche der Behandlung ist der Exponent mit 0.144 niedriger als der, der Referenzgruppe bei 0.166 (**Abb. 15**). Je größer der Exponent ist, desto größer ist die Dynamik des zugrundeliegenden Prozesses nach DENTON (1990). Der Exponent steigt leicht mit der Therapie bei den behandelten Pferden, er gleicht sich dem Wert der Kontrollgruppe an. Das bekannte Placebo-Pferd steigt aber im maximalen Lyapunow in der 2. Woche der Behandlung noch weiter an auf 0.710. Die Dynamik der Prozesse bei diesem Tier ist sehr groß. Der leichte Anstieg des maximalen Lyapunow-Exponenten bei den behandelten Pferden spricht für eine Zunahme der möglichen Mitwirkung verschiedener Einflußgrößen bei der Steuerung der Prozesse. Das bestätigt die Verbesserung des Allgemeinbefindens der Tiere.

4.2.1.5 Zusammenfassung: Pferde der Gruppe II

Bei den Parametern des Zeitbereiches kann der Zufall einen erheblichen Einfluß auf das Ergebnis haben. Es kann nicht zwischen zufallsbedingten und geregelten Prozessen unterschieden werden. Die Entwicklung der Zeitbereichsparameter spricht bei den chronisch-obstruktiven Bronchitikern für eine Abnahme der Herzfrequenzvariabilität während der Behandlung. Bei Besserung der Herz- und Kreislaufsituation und damit auch bei der des Allgemeinbefindens würde man eine gegenteilige Entwicklung erwarten. Als alleinige Informationsgröße lassen die

Parameter des Zeitbereiches keine abschließende Beurteilung über die Änderung der Herzfrequenzvariabilität während der Behandlung zu. Sie liefert keine verlässlichen Ergebnisse.

Wenn man berücksichtigt, daß das Pferd ein absoluter Vagotoniker ist (WITTKKE und BAYER, 1968; KOLB, 1989), hätte man bei der Entwicklung der Parameter des Frequenzbereiches eigentlich eine Erhöhung der normalisierten HF-Power bei Verbesserung des Krankheitszustandes erwartet. Das Gegenteil war aber der Fall. Die Interpretation dieser Ergebnisse schließt auf eine Zunahme des Sympathikuseinflusses, der durch das verbesserte Allgemeinbefinden der Pferde während der Behandlung ermöglicht wurde. Da die Aufbereitung der Zeitreihe zur Durchführung der Spektralanalyse notwendig ist, könnten sich durch die teilweise manuelle Korrektur Fehler eingeschlichen haben, die das Ergebnis der Frequenzbereichsparameter verfälschen könnten. Trotzdem scheint die Analyse im Frequenzbereich eine wertvolle Ergänzung zu den Parametern des Zeitbereiches zu sein.

Die nicht-linearen Parameter erweitern und vervollkommen die Analyse der Herzfrequenzvariabilität. Mit Hilfe dieser Parameter kann man die Verbesserung des Allgemeinbefindens während der Medikamentenapplikation sehr gut charakterisieren und darstellen. Das Recurrence-Plot-Verfahren zeichnet sich durch seine Robustheit gegenüber der Nichtstationarität der Zeitreihen aus. Umständliches Aufbereiten entfällt bei dieser Art der Datenanalyse. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Einfluß des Zufalls mathematisch zu eliminieren, was sich als großer Vorteil erweist. Ein Manko bei der Ermittlung des maximalen Lyapunow-Exponenten ist die Vorgabe, daß für die Analyse lange stationäre Zeitreihen vorausgesetzt werden. Die sind hier in dieser Art nicht gegeben. Insofern ist die Interpretation der Werte vorsichtig vorzunehmen. Allerdings bestätigte und ergänzte der Verlauf des Exponenten in diesem Fall die Ergebnisse des Recurrence-Plots. Bei der Randomisierung des Lyapunow-Exponenten kamen wesentlich größere Werte heraus, welche die Korrektheit der nicht-randomisierten Ergebnisse unterstreichen. In diesem Fall ist von der Richtigkeit des Exponentenverhaltens während der 4-wöchigen Behandlung auszugehen.

GRAUERHOLZ untersuchte 1979 die Veränderungen im EKG von Pferden mit chronischer Bronchitis und deren Folgeerscheinungen. 6 ausgewählte Parameter waren einzeln betrachtet trotz signifikanter Unterschiede nicht derart aussagekräftig,

daß beim Einzeltier auf eine Veränderung der EKG-Kurve infolge der bestehenden Erkrankung geschlossen werden konnte. Bei gemeinsamer Beurteilung der 6 Parameter erschien dies aber möglich (GRAUERHOLZ, 1979 b). Diese Annahme wird dadurch bekräftigt, daß sich durch eine Kombination der eigenen Ergebnisse verschiedener Parameter der Herzfrequenzvariabilität ein Unterschied zwischen kranken oder gesunden Pferden feststellen läßt.

Abschließend ist anzumerken, daß die Wirkung des Acetylcysteins anhand der nicht-linearen Analysemethoden bestätigt bzw. gesichert werden kann.

4.2.2 Pferde der Gruppe III: Trabrennpferde

Von Februar bis November 1997 sind regelmäßig EKG-Aufzeichnungen bei verschiedenen Trabrennpferden durchgeführt worden. Ziel dieser Dokumentationen war es, zu testen, ob mittels der zur Verfügung stehenden Analyseparameter der Herzfrequenzvariabilität ein Trainingserfolg dargestellt werden kann. In Verbindung mit den EKG-Aufzeichnungen wurden Blut-Laktat-Bestimmungen durchgeführt, die den Trainingsfortschritt und die damit einhergehende Steigerung der Leistungsfähigkeit der Pferde bestätigten. Als Vergleichsgröße wurde hierfür die fiktive Geschwindigkeit berechnet (V_{-10}), bei der das jeweilige Pferd einen Blut-Laktat-Wert von 10 mmol/l erreicht hätte.

4.2.2.1 Inter-Beat-Intervall-Daten und Herzfrequenzen in der Erholungsphase

In den **Abb. 18** und **19** ist der Leistungszuwachs von Februar bis April deutlich zu erkennen. Die errechnete Geschwindigkeit steigt bei sinkender Herzfrequenz bzw. zunehmender Inter-Beat-Intervall-Längen. Dies ist ein deutliches Zeichen für eine gesteigerte Leistungsfähigkeit der Pferde und damit des Trainingserfolges. Im Mai steigt die Herzfrequenz an, die Inter-Beat-Intervalle verkürzen sich. Die Geschwindigkeit steigerte sich aber nochmals von April bis Mai. Das jeweilige Pferd mußte im Mai mehr Arbeit leisten, um diese Geschwindigkeit zu erreichen. Diese Tendenz war bei allen Pferden zu beobachten. Interessant ist, daß alle Pferde im Mai einen Infekt hatten, der sich in der gestiegenen Herzfrequenz widerspiegelt. In der gelaufenen Geschwindigkeit schlägt sich diese Tatsache erst im Juni nieder. Die Pferde hatten zu diesem Zeitpunkt die Rekonvaleszenz noch nicht ganz abgeschlossen, bzw. konnten den krankheitsbedingten Leistungsrückfall vom Mai noch nicht vollständig kompensieren. Leider konnten im Juni keine EKG-Aufzeichnungen getätigt werden. Im Juli und August war das Leistungsvermögen der Pferde wieder gesteigert. Es ist wieder ein deutlicher Trainingserfolg zu erkennen. Die Herzfrequenz sinkt und die errechnete Geschwindigkeit ist erhöht. Die Verlängerung der Trainingsdistanzen im September von jeweils 1000 m auf jeweils 1600 m wird verdeutlicht durch die erniedrigte errechnete Geschwindigkeit aber die dabei fast gleichbleibende Erholungs-Herzfrequenz. Der Median der Herzfrequenz

liegt im August bei 52.06 bpm und im Oktober bei 53.29 bpm. Das Pferd behält also trotz der erhöhten Belastung durch die Verlängerung der Distanz um 600 m seinen Erholungsverlauf bei. Es muß aber mehr Arbeit leisten, um diese Trainingseinheit zu absolvieren. Der Blut-Laktat-Spiegel steigt. Daraus errechnet sich dann eine geringere Geschwindigkeit über diese Distanz. Der Zustand der getesteten Pferde im November läßt die Adaptation an die neue Trainingsdistanz erkennen. Die Herzfrequenz sinkt um durchschnittlich 3 Schläge/Minute auf 50.67 bpm ab und die Geschwindigkeit konnte wieder gesteigert werden.

4.2.2.2 Zeitbereichs-Parameter

Der Parameter SDNN zeigt bei den getesteten Pferden einen uneinheitlichen Verlauf (**Abb. 20**). Trotz des Leistungszuwachses von März bis April sinkt die SDNN im Median ab. Betrachtet man die Einzelverläufe der Pferde, steigt die SDNN bei einem Pferd in diesem Zeitabschnitt an. Bei Steigerung der Leistungsfähigkeit würde man eigentlich mit einer Erhöhung der Herzfrequenzvariabilität rechnen. Der Verlauf der SDNN deutet hier aber auf eine Abnahme der HFV hin. Nur bei dem einzigen oben genannten Pferd steigt sie an. Im Mai erhöht sich der Median der SDNN wieder. Bei infektionsbedingtem Leistungseinbruch ist im Mai eine Erniedrigung der SDNN zu erwarten. Die Herzfrequenz stieg. Die Pferde mußten bei Abnahme der Belastungsfähigkeit mehr Arbeit leisten, um die errechnete Geschwindigkeit zu erreichen. Vom Juli bis August erhöht sich laut SDNN die Herzfrequenzvariabilität bei Leistungszuwachs. Dies wäre eine logische Schlußfolgerung. Nach Verlängerung der Trainingsdistanz im September, steigt die SDNN wider erwarten im Median an. Der Einfluß des Zufalls scheint bei diesem Parameter auch bei dieser Pferdegruppe einen großen Einfluß zu haben, zumal keiner der Unterschiede signifikant ist.

Der Parameter SDANN sinkt im Median von 96.08 ms bei Trainingsbeginn im Februar auf 58.74 ms nach Leistungszuwachs im April ab (**Abb. 20**). Daraus kann man schließen, daß die Pferde zunehmend in der Lage waren, ihre Herzfrequenz nach Belastung schneller wieder auf den Ruhewert abzusenken. Bei Leistungseinbruch im Mai steigt der Wert der SDANN wieder etwas an. Bei Betrachtung der Einzelverläufe steigt die SDANN bei dem gleichen auffälligen Pferd aus der Darstellung der SDNN durchgehend von März bis Mai an. Auch bei diesem

Parameter findet sich also ein uneinheitlicher Verlauf. Bei Steigerung der Leistungsfähigkeit der Pferde von Juli bis August sinkt die SDANN leicht ab. Nach Verlängerung der Renndistanz steigt sie wieder an. Die Werteverläufe dieses Parameters scheinen, da der Zufall hier nicht so einen großen Einfluß hat, in der Gesamtheit die Entwicklung der Pferde während des Trainings besser zu repräsentieren.

Der Parameter RMSSD steigt als ein Maß für die Variabilitätsänderung bei Leistungszuwachs der Pferde erwartungsgemäß an (**Abb. 20**). Bei Leistungseinbruch im Mai sinkt er ab. Auch bei Leistungssteigerungen der Pferde von Juli bis August und nach Distanzverlängerung von Oktober zum November zeigt dieser Parameter eine steigende Tendenz. Die Interpretation dieses Wertverlaufes bestätigt die Erhöhung der Herzfrequenzvariabilität um den Ruhewert bei Steigerung der Leistungsfähigkeit. Das Vorhandensein eines Trainingserfolges wird hierdurch gesichert.

4.2.2.3 Frequenzbereichs-Parameter

Die Parameter des Frequenzbereiches zeigen einen bei Steigerung der Leistungsfähigkeit der getesteten Pferde erwarteten Verlauf der verschiedenen Power-Komponenten (**Abb. 21**). Die normalisierte LF-Power nimmt bei sinkender Herzfrequenz und steigender errechneter Geschwindigkeit ab. Der Einfluß des Sympathikus wird geringer. Im gleichen Zeitabschnitt erhöht sich der vagale Einfluß, der sich in einer Erhöhung der HF-Power widerspiegelt. Da das Pferd nach WITTKKE und BAYER und auch nach KOLB als ein Vagotoniker zu bezeichnen ist (WITTKKE und BAYER, 1968; KOLB, 1989), unterstreicht die Entwicklung dieser Parameter besagte Einschätzung. Beim infektiös bedingten Leistungseinbruch im Mai steigt der sympathische Einfluß wieder an, der Vaguseinfluß verringert sich. Vom Juli zum August steigt die LF-Komponente wieder leicht an. Die Pferde haben ihr Leistungshoch nach dem Infekt noch nicht wieder erreicht, der sympathische Einfluß ist bei sinkender vagaler Beteiligung höher als vor der Erkrankung. Interessant ist auch der Anstieg der LF-Power nach Verlängerung der Trainingsdistanz um 600 m. Die Länge der Inter-Beat-intervalle bleibt zwar fast auf dem gleichen Level bei

gestiegener Leistung, aber man bekommt einen Einblick in die sympathovagale Regelung dieser gestiegenen Belastung. Der Sympathikus tritt in Vorherrschaft, der Vagus-Einfluß tritt zurück. Der Quotient aus LF- und HF-Komponente ist ein Gradmesser der sympathovagalen Balance. Ist die HF-Power größer, ist der Quotient klein, überwiegt die LF-Komponente, ist der Quotient größer. Diese Ratio sinkt bei Leistungszuwachs von Februar bis April. Die vagale Einwirkung nimmt zu. Im Mai steigt die Ratio erwartungsgemäß an, da bei Krankheit der Sympathikus überwiegt. Von Juli bis August und von Oktober bis November spiegelt die Ratio den steigenden sympathischen Einfluß wieder. Die Parameter des Frequenzbereiches erlauben einen sicheren Einblick in die sympathovagale Steuerung des sich bessernden Trainingszustandes der Pferde in Verlaufskontrollen.

4.2.2.4 Nicht-lineare Komponenten

4.2.2.4.1 Recurrence-Plot-Parameter

Die vom Zufall bereinigte %recurrence verringert sich bei Leistungszuwachs (**Abb. 22**). Das spricht für den Übergang von periodischer zu einer aperiodischen Prozeß-Dynamik, Ausdruck des Vorhandenseins eines chaotischen Systems (Denton, 1990). Bei geschwächtem Allgemeinbefinden der Pferde aufgrund des Infektes im Mai, steigt der Prozentsatz der recurrence wieder an. Von Juli bis August steigt die %recurrence im Median wieder leicht an, es dominieren Prozesse mit aperiodischer Dynamik. Nach Verlängerung der Trainingsdistanz im September, fällt der Prozentsatz der Recurrence von Oktober zum November wieder leicht ab. Die Pferde sind dabei, die erhöhte Distanz (mit einhergehender gesteigener Belastung) zu kompensieren. Der Trend geht in Richtung aperiodischer Dynamik der Regelungsprozesse.

Die korrigierte %determinism nimmt mit Steigerung der Leistungsfähigkeit in den Monaten Februar bis April ab (**Abb.22**). Der Anteil der geordneten Dynamik reduziert sich. Die Organisation der biologischen Prozesse im "System Pferd" ist gelockert. Die beim Training geleistete Arbeit führt zu vielfältigeren Einflüssen auf die Regelungsprozesse. Bei Leistungseinbruch im Mai, erhöht sich der Prozentsatz

determinism. Durch den Infekt sind die Pferde in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt. Die Möglichkeit, daß viele Einflüsse in die Regelungsprozesse eingreifen können, ist eingeschränkt. Bei wieder hergestellter Belastungsfähigkeit der Pferde im Juli, sinkt die %determinism wieder etwas ab. Es werden wieder mehr Möglichkeiten der Prozeßregelung nutzbar. Nach Verlängerung der Distanz, ist der Prozentsatz der determinism wieder etwas angestiegen, weil die Belastung der Pferde im Training gewachsen ist. Zum November hin, sinkt die %determinism aber wieder etwas ab, das biologische "System Pferd" beginnt, sich an die gesteigerte Forderung zu adaptieren.

Die Ratio aus %determinism/%decurrence beschreibt die Stationarität eines Systems (**Abb. 22**). Die Ratio steigt bei Leistungszuwachs in den Monaten Februar bis April an. Das "System Pferd" geht von einem Zustand in den anderen über. Die gesteigerte Leistungsfähigkeit der Pferde ist durch eine breitere Variation von Möglichkeiten gekennzeichnet, die nun in der Lage sind, Einflüsse auf die Regelungsprozesse vornehmen zu können. Die Ratio sinkt bei Krankheitseinbruch im Mai ab. Die Vielfalt der wahrscheinlichen Einwirkungen ist durch den Infekt begrenzter geworden. Im Juli ist die Ratio noch tiefer abgesunken. Sie steigt aber zum August hin wieder an. Nach der Erkrankung der Pferde haben sie ihr vorheriges Leistungshoch noch nicht wieder erreicht. Zum August hin verbessern sie sich aber wieder. Im Oktober zeichnet sich die erhöhte Belastung durch einen wieder erniedrigten Ratio-Wert aus. Zum November hin, steigt er aber wieder an. Das biologische "System Pferd" ist zunehmend wieder in der Lage, mehr Einflüsse auf die Regelungsprozesse zuzulassen und erhöht damit seine Leistungsfähigkeit.

Die entropy als weiteres Ergebnis des Recurrence-Plots, beschreibt den Ordnungsgrad der Daten und damit die Komplexität eines Systems (**Abb. 22**). Bei steigendem Leistungszuwachs, verringert sich der Wert der entropy. Dynamische Prozesse werden mit weniger „Aufwand“ betrieben und sind geordneter, straffer organisiert. Die Kompliziertheit des Systems nimmt ab. Die Regelung der Prozesse wird durch den Trainingserfolg optimiert. Beim Infekt im Mai steigt der Wert der entropy an. Bei Belastung durch Arbeit, ist das Pferd bei diesem körperlichen Zustand nicht in der Lage, die Regelungsprozesse straffer zu organisieren. Im Juli hat die entropy wieder einen kleineren Wert angenommen, der sich zum August hin

weiter reduziert. Nach Verlängerung der Renndistanz ist die gesteigerte noch nicht kompensierte Belastung im Oktober Ausdruck des angestiegenen entropy-Wertes. Die Steuerungsdynamik hat sich an die gesteigerte Leistungsforderung noch nicht adaptiert. Im November hat die Leistungsfähigkeit der Pferde wieder zugenommen, so daß das System Pferd die Regelungsmechanismen optimieren konnte.

4.2.2.4.2 Maximaler Lyapunow-Exponent

Der vom Zufall korrigierte maximale Lyapunow-Exponent ist im Verlaufe des Trainings von Februar bis November ausnahmslos positiv, und indiziert damit das Vorhandensein eines chaotischen Systems (**Abb. 23**). Der Exponent steigt mit Zunahme der Belastungsfähigkeit von Februar bis März, der Grad der Dynamik nimmt zu. Im April sinkt er bei sich weiter steigender Leistungsfähigkeit ab. Die Dynamik des zugrundeliegenden Prozesses verringert sich, es haben weniger Einflußgrößen die Möglichkeit, bei der Regelung der verschiedenen Prozesse mitzuwirken. Bei Krankheitseinbruch im Mai, steigt der Lyapunow-Exponent wieder an. Die Pferde müssen mit einer krankheitsbedingten höheren Belastung fertig werden, um ihre Leistung zu erbringen. Die Anzahl der Einflußfaktoren nimmt zu und damit auch der Grad der Dynamik. Von Juli zu August steigt der Exponent weiter an. Die Pferde müssen mehr Aufwand betreiben, um ihre Dynamik zu regulieren. Eine mögliche Erklärung des gestiegenen Exponenten im August könnte sein, daß die Pferde im Training überlastet wurden. Sie mußten eine Leistung erbringen, die nicht ihrem Konditionszustand entsprach. Vielleicht war nach der Krankheit im Mai die Rekonvaleszens noch nicht vollständig abgeschlossen. Der leichte Anstieg des Lyapunow-Exponenten von Oktober zu November erklärt sich durch die verlängerte Distanz im Training. Die Dynamik der zugrundeliegenden Prozesse hat mit der gestiegenen Belastung zugenommen.

4.2.2.5 Zusammenfassung: Pferde der Gruppe III

Bei den Trabrennpferden auf der Rennbahn ist der Grad der Belastung der einzelnen Pferde in ihren jeweiligen Belastungsstufen zum Zeitpunkt der Untersuchung nur schwer zu vereinheitlichen. Der Trainer legte die individuelle Trainingsbelastung der Pferde subjektiv fest. Es ist aber beim Rennpferd geradezu unmöglich, eine exakte Geschwindigkeitseinhaltung über eine bestimmte Distanz in Feldstudien einzufordern. Hier könnten möglicherweise Fehler aufgetreten sein. Die Ergebnisse der Laktat-Geschwindigkeits-Relation zeigen aber trotz dieser ungenauen Vorgaben einen einheitlichen Verlauf. Zur Abschätzung eines möglichen Trainingserfolges ist als Vergleichsgröße die fiktive Geschwindigkeit berechnet worden, bei welcher der Blut-Laktat-Spiegel einen Wert von 10 mmol/l erreicht hätte. Diese Geschwindigkeit darf nicht dahingehend interpretiert werden, daß das Pferd diesen Blut-Laktat-Spiegel aufweist, wenn es mit dieser Geschwindigkeit die Trainingsdistanz von 1000 m oder ab September von 1600 m durchläuft. Es muß vielmehr beachtet werden, daß die Blutproben nach jeweils einer Belastungsstufe entnommen werden. Die Höhe der gemessenen Laktat-Werte wird immer auch durch die vorangegangene Belastungsstufe mitbestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen aber, daß der gewählte Vergleichswert von „V-10“ gut geeignet ist, einen Trainingsfortschritt zu verdeutlichen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse verschiedener Analyseparameter sollte nicht vergessen werden, daß teilweise nur die Daten zweier Pferde in die Analyse eingegangen sind. Aus technischen Gründen war es leider nicht immer möglich, von jedem Pferd an jedem Untersuchungszeitpunkt ein EKG abzuleiten. Interessanter wäre es natürlich gewesen, wenn man die Entwicklung bestimmter Pferde, die sich im Training als besonders leistungsstark erwiesen, über den gesamten Trainingsverlauf hätte dokumentieren können. Es hätten sich dadurch vielleicht anders gewichtete Ergebnisse ergeben.

Der uneinheitliche Verlauf der Zeitbereichs-Parameter bei gleichförmigem Konditionszuwachs und Verhalten der Pferde liefert widersprüchliche Aussagen. Parameter des Zeitbereiches scheinen alleine ungeeignet zu sein, Analysen durchzuführen.

Die Ergebnisse der Frequenzbereichs-Parameter liefern interessante und nachvollziehbare Einsichten in die sympathovagalen Steuerungsprozesse bei Steigerung der Kondition durch regelmäßiges Training. Diese Parameter scheinen sehr geeignet zu sein, Änderungen der Herzfrequenzvariabilität zu verdeutlichen. Wie schon bei der Zusammenfassung für die Ergebnisse der Pferde-Gruppe II angeführt wurde, ist es aber ein Manko dieser Analyseform, daß die Zeitreihe zur Durchführung der Spektralanalyse erst aufbereitet werden muß. Durch die teilweise manuelle Fehlerkorrektur besteht die Möglichkeit, daß sich Fehler eingeschlichen haben, die zu verfälschten Ergebnissen geführt haben könnten. Die Verläufe der einzelnen Power-Komponenten in normalisierten Einheiten sprechen aber für eine korrekte Analyse der aufbereiteten Zeitreihen, die frühere Ergebnisse aus humanmedizinischen Untersuchungen bestätigen (SAUL, 1990).

Die nicht-linearen Parameter bieten einen sehr guten Einblick in die sich ändernde Dynamik der Prozesse und deren Regelungsmechanismen bei Konditionszuwachs. Sie ergänzen und erweitern die Ergebnisse der Parameter des Frequenzbereiches und liefern einen genaueren Einblick in die Mechanismen der Variabilitätsänderungen der Herzfrequenz. Außerdem stellt das Recurrence-Plot-Verfahren wegen seiner Robustheit gegenüber nichtstationären Zeitreihen eine gute und unkomplizierte Analyseform dar, die ohne Aufbereitungen durchführbar ist. Die Errechnung des maximalen Lyapunow-Exponenten setzt lange stationäre Zeitreihen voraus, die hier in dieser Art nicht gegeben sind. Insofern ist die Interpretation der Werte vorsichtig vorzunehmen und gestaltet sich während des Trainingsverlaufes schwierig.

MILL und LEHMANN und auch LUTZ et al. kamen bei ihren Untersuchungen zu dem Schluß, daß regelmäßiges Training beim Sportpferd zu einer Abnahme der Ruhe-Herzfrequenz führt. Funktionell wird ihrer Meinung nach diese Erscheinung aufgrund der mit zunehmendem Trainingszustand zu verzeichnenden Abnahme der Sympathikuserregbarkeit bei unveränderter Erregbarkeit des N. vagus. Der Vagustonus überwiegt dabei (MILL und LEHMANN, 1969; LUTZ et al., 1976). Eine Erniedrigung der Ruhe-Herzfrequenz wurde bei den zur Verfügung stehenden Trabrennpferden bei unseren Untersuchungen nicht festgestellt.

Im Jahre 1977 untersuchte MILL den Diastolen-Systemen-Quotient im EKG unter anderem auch bei verschiedenen Trabrennpferden und die Beziehung zur Leistung.

Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß Trainingsarbeit zur Entwicklung der speziellen Ausdauer offensichtlich einen spezifischen Reiz auf die Herztätigkeit ausübt. Dieser führt zu verstärkter Ökonomisierung der Herzarbeit. Gute Pferde in gutem Trainingszustand besitzen nach MILL die Fähigkeit, ihre Systole bei steigender Herzfrequenz zu verkürzen. Die Diastole nimmt dabei weit weniger stark ab. Die erhöhte Kontraktionskraft des trainierten Herzens in der Systole, unterstreicht die Bedeutung einer gezielten Trainingsgestaltung für die Ökonomisierung der Herzarbeit und die Wiederherstellung der Feinstruktur der Myozyten nach Belastung (MILL, 1977). Diese Ökonomisierung der Herzarbeit kann durch die Ergebnisse der Analysen mittels Parametern des Frequenzbereiches und nicht-linearer Parameter bewiesen werden.

4.2.3 Vergleich der Ergebnisse beider Gruppen

Die Parameter des Zeitbereiches zeigen bei der Gruppe der bronchitiskranken Pferde einen relativ einheitlichen Verlauf, bei den Trabrennpferden einen uneinheitlichen Verlauf. Die Applikation von Acetylcystein führt laut dieser Parameter bei den Pferden der Gruppe II nicht zu einer Steigerung der Herzfrequenzvariabilität, die man eigentlich erwartet hätte. Bei den Rennpferden steigt aufgrund der Ergebnisse dieser Parameter bei Leistungszuwachs bei manchen Pferden die Herzfrequenzvariabilität an, was erwartet wird. Bei anderen erniedrigt sie sich. Man muss bei diesen beiden Pferdegruppen sicherlich die Eingangsvoraussetzungen der Inter-Beat-Intervall-Reihe mit berücksichtigen. Die kranken Pferde wurden vorher keiner Belastung unterzogen, es wurden ausnahmslos Ruhe-EKG's angefertigt. Die Rennpferde sind vorher verschiedenen individuellen Belastungsstufen ausgesetzt worden, so daß hier eine Abklingrate in die Analyse kam, in der die Regelungsmechanismen, die dafür sorgen, daß die Pferde wieder in den Ruhezustand gelangen, mit in die Ergebnisse einbezogen werden müssen. Nach SKARDA et al. kann man die Nachbelastungszeit beim Pferd in drei Phasen einteilen: in der 1. Phase, die 5 bis 10 Minuten anhält, kommt es zu einer raschen Abnahme der Herzfrequenz während der langsamen Erholung des Pferdes. In der 2. Phase, die von der 10. bis zur 40. Minute nach Belastung anhält, kommt es zu einer langsamen weiteren Beruhigung der Tiere in Richtung der Präbelastungswerte. In

der letzten, der 3. Phase, nähern sich die Pferde allmählich ihrem Ruheherzfrequenzbereich. Die 3. Phase kann länger als 60 Minuten dauern (SKARDA et al., 1976).

Der Zeitraum unserer Analyse begann, als die Pferde nach der Belastung das erste mal eine Herzfrequenz von 60 Schlägen/Minute erreicht hatten und dauerte 20 Minuten. Dieser Zeitabschnitt ist der Phase 2 nach SKARDA et al. zuzuordnen.

Daraus ließen sich auch die unterschiedlichen Verläufe der LF- und HF-Power-Komponenten der Frequenzbereichs-Parameter bei den beiden Pferdeguppen erklären. Das krankheitsbedingte gestörte Allgemeinbefinden der Pferde hat vielleicht dazu geführt, daß der sympathische Einfluß unterdrückt war bzw. keine Möglichkeit hatte, in normaler Stärke seinen Einfluß geltend zu machen. Die Acetylcystein-Behandlung schaffte letztendlich die Voraussetzung dazu, daß sich bei den kranken Pferden die Herz- und Kreislauftsituation verbesserte und sich damit wieder der mögliche Einfluß des Sympathikus verstärkte. Dies wurde verdeutlicht durch den Anstieg der LF-Power. Bei den gesunden Rennpferden wurde ein trainingsbedingter Leistungszuwachs durch eine Erhöhung der HF-Power gekennzeichnet. Dieses Ergebnis unterstreicht die Auffassung von WITTKE und BAYER (1968) und auch die von KOLB (1989), daß das Pferd ein ausgesprochener Vagotoniker ist. Außerdem ist es ein natürlicher Vorgang beim Konditionszuwachs, daß die Herzfrequenz bei gleicher Arbeit abnimmt. Wobei hier nicht von einer "Trainingsbradykardie" gesprochen werden sollte, da es sich um eine Abnahme der Herzfrequenz während der Nachbelastungsphase handelt.

Bei den nicht-linearen Parametern gab es bei den beiden Pferdeguppen ebenfalls teilweise unterschiedliche Ergebnisse. Die %recurrence zeigte bei allen Pferden mit Besserung des Allgemeinbefindens bzw. bei Leistungszuwachs eine steigende Tendenz. Die %determinism nahm während der Acetylcystein-Behandlung zu, während des Konditionszuwachses bei den Rennpferden nahm sie aber ab. Bei den kranken Pferden kann man eine Erhöhung des Prozentsatzes der determinism während der Behandlung mit einer einhergehenden Straffung der Organisation der biologischen Prozesse begründen. Der Anteil der geordneten Dynamik nimmt zu, so daß sich unter der Therapie die Dynamik der Herzfrequenzvariabilität wieder normalisiert. Bei den Rennpferden würde man die Verringerung der %determinism

dahingehend interpretieren, daß sich der Anteil der geordneten Dynamik reduziert. Die Arbeit des Trainings führt bei dieser Gruppe von Pferden zu einer anderen Art von Regulationsmechanismen. Es werden völlig andere Anforderungen an das biologische "System Pferd" gestellt. Daraus läßt sich der unterschiedliche Verlauf dieses Parameters und des der entsprechenden Ratio erklären. Die entropy steigt bei Medikamentenapplikation an, bei den Rennpferden sinkt sie mit Leistungszuwachs ab. Die deterministische Struktur des Systems wird bei den behandelten Pferden der Gruppe II umfassender. Sie ist aus vielen Einflußgrößen zusammengesetzt, aber bildet doch eine Einheit. Das gesteigerte Allgemeinbefinden resultiert aus der Möglichkeit, wieder mehr Einflußgrößen zur Regulation von Prozessen nutzen zu können. Bei den Athleten Rennpferd führt der Konditionszuwachs zu einer Optimierung vorhandener Regulationsmechanismen.

Der maximale Lyapunow-Exponent steigt bei den Pferden der Gruppe II und denen der Gruppe III im Laufe der Behandlung bzw. bei Leistungssteigerung überwiegend an. Der Grad der Dynamik nimmt bei beiden Gruppen zu. Ausnahmslos waren die Exponenten positiv, was für das Vorhandensein eines chaotischen Systems spricht.