

**Aus der Medizinischen Universitätsklinik und Poliklinik Tübingen**

**Abteilung Sportmedizin**

**Kommissarischer Leiter: Privatdozent Dr. Th. Horstmann**

**Die Analyse der Laufleistung als Beispiel für  
multifaktorielle Vorhersagerechnungen mit  
biometrischen Daten**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard-Karls-Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von  
Gisela Monika Kempter  
aus Heimenkirch/Allgäu**

**2003**

Dekan: Professor Dr. C. D. Claussen

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. K. Röcker

2. Berichterstatter: Professor Dr. K. Dietz

## Meinen Eltern



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1	Problemstellung	7
1.2	Hypothesen	8
1.2.1	Individuelle Anaerobe Schwelle (IAS)	8
1.2.2	Alter und Anthropometrie	10
1.2.3	Herz	11
1.2.4	Lunge	13
1.2.5	Orthopädie	14
1.2.6	Trainingsdaten	15
1.3	Untersuchungsziele	17
<b>2</b>	<b>Untersuchungsgut und Methode</b>	<b>18</b>
2.1	Untersuchungsgut	18
2.2	Untersuchungsmethoden	18
2.2.1	IAS	19
2.2.2	Alter und Anthropometrie	20
2.2.3	Herz	20
2.2.4	Lunge	21
2.2.5	Orthopädie	22
2.2.6	Trainingsdaten	22
2.3	Übersicht über die statistischen Verfahren	23
2.3.1	Gruppierung, t-test, Korrelation	23
2.3.2	Regression	25
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>27</b>
3.1	Daten und Messwerte	27
3.2	IAS	29
3.3	Alter und Anthropometrie	31
3.4	Herz	34
3.5	Lunge	38

3.6	Orthopädie	40
3.6.1	Ischiocrurale Muskulatur	40
3.6.2	Rücken	42
3.6.3	Fußdeformitäten	46
3.7	Trainingsdaten	47
3.8	Regressionsanalyse aller Merkmale	49
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>66</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Der Laufsport ist sowohl im Freizeit- als auch im Hochleistungsbereich eine der ältesten sportlichen Disziplinen. Während sich bei anderen Sportarten die Qualität von Geräten und Ausrüstung auf gute oder schlechte Leistungen entscheidend mit auswirkt, kommt es beim Laufen neben geeignetem Schuhwerk rein auf den Sportler selbst an. Wo beispielsweise beim Radrennsport oder Skisprung ständig daran gearbeitet wird, neue Technologien und verbessertes Material zur Erzielung einer Leistungssteigerung zu entwickeln, fallen diese Komponenten beim Laufsport weg und es bleibt nur das Training des eigenen Körpers. Diese Tatsache erhöht gleichzeitig den Wert des Erfolges: gute Leistungen werden aus eigener Kraft, ohne die „Fremdhilfe“ einer guten Ausrüstung erbracht. Umso wichtiger ist es zu wissen, welche körperlichen Bedingungen die Laufleistungen beeinflussen. Dies ist nicht nur für Hochleistungssportler von Bedeutung; auch wer im Amateurbereich gute Leistungen erzielt, hat mit dem Erfolgserlebnis mehr Spaß am Laufen – eine psychische Komponente, die sich unweigerlich positiv auf die Gesundheit auswirkt. Ferner ermöglicht ein Wissen um die Einflüsse auf Laufleistungen die Vorhersage, ob ein Mensch überhaupt für gute Leistungen im Laufsport geeignet ist. Ebenso kann es zur differenzierten Talentauswahl beitragen.

Leistung wird dabei nicht im physikalischen Sinne ( $\text{Leistung} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg pro Zeit}$ ) definiert (43). Im Sportbereich ist Leistung das Ergebnis einer sportlichen Bewegungshandlung, deren Resultat durch Messung ermittelt wird (64). Im Laufsport erfolgt die Messung der Leistung über die Zeit und ihre weitere Umrechnung in die Laufgeschwindigkeit (Weg pro Zeit). Diese eignet sich bestens als Maßstab für einen Vergleich zwischen Sportlern.

Unzählige Faktoren spielen für die Höhe der Laufgeschwindigkeit eine Rolle. Im folgenden Unterkapitel werden im Vergleich mit der gängigen Literatur Hypothesen aufgestellt, die unter Zuhilfenahme der erfassten biometrischen Daten in Kapitel 3

bestätigt oder widerlegt werden. Diese Arbeit dient dabei als Modell für multifaktorielle Vorhersagerechnungen – nicht nur für den Sektor (Leistungs-)Sport, sondern auch in Bezug auf die Pathogenese von Krankheiten oder die Erhaltung von Gesundheit.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfachheit halber durchweg die männliche Form für die Läuferinnen und Läufer verwendet. Erfolgte nicht explizit eine andere Angabe, so sind damit stets beide Geschlechter gemeint.

## **1.2 Hypothesen**

### ***1.2.1 Individuelle Anaerobe Schwelle (IAS)***

Frühere Lehrmeinungen gingen davon aus, dass konstante Grenzwerte wie zum Beispiel  $4\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  zur Definition der Ausdauerleistungsfähigkeit verwendet werden könnten. Allerdings berücksichtigte dieses Konzept nicht, dass sich die Laktatkonzentration in Ruhe variabel zeigt und die Schwellenwerte durch Training und andere Faktoren verschiebbar sind (53, 88, 135). Fixe Blutlaktatkonzentrationen sind nach dieser Erkenntnis zwischen gut und schlecht trainierten Sportlern nicht vergleichbar (51, 129). Demzufolge werden feste Blutlaktatkonzentrationen heute nicht mehr als verlässlich angesehen. Als Alternative hat sich das Konzept der sogenannten „Individuellen Anaeroben Schwelle“ (IAS; errechnet aus Blutlaktatkonzentration an der Laktatschwelle plus  $1,5\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  Laktat) bewährt (28, 47, 61, 119, 120).

Die IAS zeichnet sich durch niedrige Interobserver-Variabilität, hohe Objektivität, Reliabilität und Reproduzierbarkeit aus. Ebenso ist sie unsensibel gegenüber wechselnden Ausgangssituationen (21, 33, 96).

Keith et al. (66) zeigten, dass ein Training an der oder um die IAS signifikante Änderungen der Indikatoren für Trainingsadaptation bewirkt. Die Einbeziehung der IAS und der Laktatakkumulation hat sich für Trainingsempfehlungen und als Trainingskontrolle durchgesetzt (20, 41, 119, 145). Ohne Berücksichtigung der IAS sind Angaben von zum Beispiel Herzfrequenz und Anteil an der maximalen

Sauerstoffaufnahmekapazität nicht ausreichend, denn diese variieren je nach IAS beachtlich (98). Für den Langstreckenlauf wurde eine hohe Korrelation von Herzfrequenz an der Laktatschwelle zur Laufleistung beobachtet (2, 87). Diese Korrelation lag höher als diejenige von Geschwindigkeit an der Laktatschwelle zur Laufleistung, weshalb ersteres für Vorhersageberechnungen beim 5km- und 10km-Lauf empfohlen wird (2). Die Laufgeschwindigkeit zeigte mit zunehmender Distanz eine zunehmende Korrelation zur IAS, während die IAS für die 1.500-m-Strecke als Prädiktor keine Berücksichtigung mehr fand (121). Dies kann als Hinweis für den hohen Einfluss anaerober Energiebereitstellung beim 1.500-m-Lauf, zunächst durch energiereiche Phosphate, angesehen werden.

Die physiologische Bedeutung der energiereichen Phosphate ATP und Kreatinphosphat liegt in ihrer schnellen Aktivierbarkeit bei Belastungsbeginn, d.h. noch bevor das Herz-Kreislauf-System energiereiche Substrate und vor allem Sauerstoff an die Muskelzellen heranbringen kann. Die energiereichen Phosphate sind in der Lage, anaerob intrazellulär gespeicherte chemische Energie in mechanische Energie und Wärme umzusetzen. Sind diese schnell verfügbaren Energiequellen erschöpft, muss auf die Energiereserven der Kohlenhydrate zurückgegriffen werden. Beim anaeroben Abbau von Glucose zu Laktat wird weitere Energie gewonnen (71).

Diese wenige Minuten anhaltende anaerob-laktazide Energiebereitstellung wird durch den aeroben Glykogenabbau abgelöst. Bei Ausdauerleistung kann aus den Vorräten an Glykogen und auch Fett durch oxidative Prozesse (aerob) ständig Energie nachgeliefert werden. Durch die IAS wird primär die aerob-oxidative Arbeitskapazität gemessen (71, 120).

In mehreren Studien wurde eine negative Korrelation von IAS und Laufzeit (78) bzw. eine positive Korrelation von IAS und Laufgeschwindigkeit im Langstreckenlauf ermittelt (86, 121, 134, 135) und die Vorhersagbarkeit der Marathonzeit mittels IAS bescheinigt (54). Allerdings sei diese unter Berücksichtigung weiterer Faktoren verbesserbar (54, 121).

Hypothesen:

- a) Die IAS ist eine gut geeignete Größe für die Vorhersage von Laufleistungen.
- b) Je höher die IAS (in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), desto höher ist die Wettkampflaufgeschwindigkeit des Sportlers.
- c) Auf der Distanz 1.500m spielt die Ausprägung der IAS eine geringere Rolle als auf den größeren Distanzen.

### ***1.2.2 Alter und Anthropometrie***

Man kann davon ausgehen, dass der Einfluss anthropometrischer Parameter auf die Laufleistung nicht unerheblich ist und diese daher berechtigterweise in Vorhersageberechnungen mit eingehen sollten (67, 133). Laut Weineck (142), ist es das zunehmende Alter, durch das die Schnelligkeit am frühesten und ausgeprägtesten eine Abnahme erfährt. Umgekehrt lässt sich eine Steigerung der Schnelligkeit im Laufsport während des Kindes- und Jugendalters hervorragend trainieren (23). Sie nimmt vom Jugend- zum Erwachsenenalter weiterhin zu, bis sie etwa mit der Vollendung der 2. Lebensdekade ihr Maximum erreicht (88). Mit weiter zunehmendem Lebensalter sinkt die Laufleistung wieder ab (35, 136), obwohl die Fähigkeit, hohe Laufgeschwindigkeiten zu erreichen, durch Training in höhere Altersstufen hinausgeschoben werden kann (46, 88). Bei mittelalten und älteren Läufern wurde das Lebensalter mit als geeignetstes Merkmal für Vorhersagen von Laufleistungen im Langstreckenlauf beschrieben (35, 89, 132).

Während bei Ausdauerläufern gegenüber nicht-trainierenden Kontrollgruppen allgemein ein geringeres Körpergewicht gemessen werden kann, scheint zusätzlich der Körperfettanteil bei den besten unter den Läufern signifikant geringer zu sein als bei Läufern mit schlechteren Ergebnissen (8, 9). Auch der Body-Mass-Index (BMI) wurde als eines der signifikanten Vorhersagemerkmale beschrieben (16, 89).

Für die Untersuchung eines Einflusses der Körpergröße könnten im Laufsport die Merkmale Schrittlänge und Schrittfrequenz von Interesse sein. Obwohl Hollmann (53)

von der Schrittlänge als bedeutenderem Einflussnehmer ausgeht, haben Letzelter (83) und Ballreich (11) bei Steigerungen von Schrittlänge und –frequenz die größeren Verbesserungen für die Schrittfrequenzsteigerung beobachtet. Groh (45) konnte zwar eine Korrelation von Schrittlänge und –frequenz mit den Laufgeschwindigkeiten feststellen, doch keinen statistisch signifikanten Zusammenhang nachweisen. Ebenso schlossen Cavanagh et al. (17), dass anthropometrische Parameter nicht primär Schrittlänge und –frequenz bestimmen und letztere beiden deshalb nicht aus der Körpergröße vorhergesagt werden können. Im 10km-Lauf stellten Bale et al. (8) sogar fest, dass bei den Männern die besten Läufer von geringerer Körpergröße waren. Bei Frauen dagegen konnte kein Größenunterschied zwischen guten und schlechten Läuferinnen festgestellt werden (9).



Hypothesen:

- a) Die Laufleistung nimmt bis etwa zum 30. Lebensjahr zu, um danach rückgängig zu werden.
- b) Die Laufleistung ist um so besser, je geringer Körpergewicht, BMI und Körperfettanteil sind.
- c) Die Körpergröße übt zumindest bei Frauen keinen entscheidenden Einfluss aus.

### **1.2.3 Herz**

Seit den 80er Jahren wurde in der Sportmedizin zunehmend die Echokardiographie zur Herzgrößenbestimmung eingesetzt (26, 31, 36, 85, 122, 128, 139). Daneben wurden mit Hilfe der Echokardiographie vor allem Ende der Siebziger und während der Achtziger Jahre Untersuchungen zu Strukturveränderungen des Herzens bei Sportlern durchgeführt (29, 111, 123). Das Herzvolumen als Maß für die Größe des Herzens wird bei Hollmann (53) für den gesunden Mann mit durchschnittlich 700 bis 800ml angegeben. Frauen liegen etwas darunter. Studien, bei denen zuvor untrainierte Versuchspersonen ein Trainingsprogramm durchliefen, zeigten bereits nach einigen Wochen eine Vergrößerung des linken Herzens und ein Absinken des Ruhepulses (124, 126, 144). Die Strukturveränderungen der Herzen von Athleten unterschieden sich

jedoch je nach Sportart: Athleten dynamischer (Ausdauer-)Sportarten mit ihren isotonischen Bewegungsabläufen zeigten eine proportionale (exzentrische) Herzvergrößerung, d.h. es fanden sich sowohl eine Erweiterung des linken Ventrikels mit vergrößertem enddiastolischen Durchmesser (EDD), als auch eine Verdickung der Herzwände. Das Verhältnis linksventrikulärer EDD zu Wanddicke war gleich dem der untrainierten Kontrollgruppen (37, 68). Herzen von Statisch-Krafttrainierenden ergaben konzentrische Veränderungen mit wesentlich größerem Anteil an Wandverdickungen, wobei vor allem das Septum und die Herzhinterwand betroffen waren (22, 40, 68, 101, 102, 112).

Genetische Faktoren scheinen zumindest bei der Größe des linksventrikulären Durchmessers keine Rolle zu spielen (38, 39). Innerhalb der Gruppe der Läufer zeigten Sprinter zwar ebenfalls eine Erweiterung der linken Herzkammer, doch bei den Langstreckenläufern war die Wandhypertrophie stärker ausgeprägt (18, 59). Ebenfalls wurde eine Dilatation des linken Vorhofes beobachtet (59). Ein physiologisch hypertrophiertes Herz zeigt eine verbesserte Auswurfleistung (59), unterstützt damit den erhöhten Sauerstoffverbrauch während eines Laufes und dürfte so zu besseren Laufleistungen beitragen. Trotz gegensätzlicher Annahme stellten Mickelson et al. (99) jedoch fest, dass keiner der Parameter von Herzgröße oder -funktion die Zeiten von 10.000m oder Marathon vorhersagen konnte. Campbell (16) beschrieb aber die Ruheherzfrequenz als eines der signifikanten Merkmale für Vorhersageberechnungen.

Hypothesen:

- a) Eine Vergrößerung des Herzvolumens mit Hypertrophie lässt sich bei allen langjährig trainierenden Läufern finden.
- b) Selbst bei denjenigen Läufern, die seit weniger als vier Jahren trainieren, sind Veränderungen der Herzstrukturen erkennbar.
- c) Die Laufgeschwindigkeiten lassen sich zumindest auf den Distanzen 10.000m und Marathon nicht anhand der Herzgröße vorhersagen.

### **1.2.4 Lunge**

In den Alveolarräumen der Lunge findet der lebensnotwendige Gasaustausch statt. Sauerstoff wird in das Blut aufgenommen, Kohlendioxid an die Außenwelt abgegeben. Bei körperlicher Belastung steigt die Anforderung an die Lunge, mehr Sauerstoff zu fördern. Analog zum Herzen hat sie kurzfristig die Möglichkeit, die Atemfrequenz zu steigern, um das Atemminutenvolumen (Produkt aus Atemfrequenz und eingeatmetem Volumen pro Atemzug) und somit die Sauerstoffzufuhr zu erhöhen (100, 142). Als Adaptationsvorgänge bei Ausdauerbelastung wurden eine Erhöhung der Diffusionskapazität, erhöhte Dichte des Kapillarnetzes und Kräftigung der für die Ventilation verantwortlichen Muskulatur diskutiert (6). Für Anpassungsreaktionen bei entsprechendem Training ist beobachtet worden, dass die maximale Sauerstoffaufnahme pro Minute innerhalb zwei bis drei Monaten um durchschnittlich 15 – 30 % gesteigert werden kann (53). Studien zeigten, dass die Muskelkraft der Atemmuskulatur trainierbar zu sein scheint (82, 90, 118). Einer bei zahlreichen Ausdauersportlern festgestellten erhöhten Vitalkapazität jedoch liegt vermutlich eher eine Selektion bestimmter Ausdauerarten denn Training zugrunde (24, 131). Von Löllgen wurde mitgeteilt, Vitalkapazität und FEV1 seien von untergeordneter Bedeutung, wenn es um die Einschätzung von Fitness und Trainingsstatus gehe (84). Allerdings wurden in einer gegenüberstellenden Studie von älteren trainierten Menschen mit älteren Untrainierten die besseren Leistungen bei denjenigen Sportlern beobachtet, welche bessere Lungenfunktionswerte aufwiesen. Dies scheint für junge Sportler nicht zuzutreffen (76). Auch scheint Ausdauertraining die Verschlechterung von Vitalkapazität und FEV1 im Alter aufzuhalten (49, 74). Bei Jugendlichen und Erwachsenen gibt es allerdings keine Beweise, dass Training die Vitalkapazität oder die forcierte Einsekundenkapazität beeinflussen würde (1, 24, 25, 34, 49, 75, 131).

Hypothesen:

- a) Anhand der Lungenfunktionswerte sind Laufleistungen nicht bzw. allenfalls für ältere Läufer vorhersagbar.
- b) Bei Spitzenläufern lassen sich gegenüber der Norm erhöhte Vitalkapazitäten finden.

### **1.2.5 Orthopädie**

#### **- Muskeldehnung**

Laufen erfordert wechselweise Anspannung und Entspannung der Skelettmuskulatur. Um eine optimale Verkürzungsgeschwindigkeit zu erreichen, d.h. schnelle Laufleistungen erbringen zu können, muss die enge Beziehung zwischen Länge und Spannung eines Muskels optimal ausgenutzt werden. Die aktive Spannung wird von der Anzahl der Aktin-Myosin-Brücken bestimmt und ändert sich mit der Sarkomerlänge. Bei gegebener Anzahl von Aktin-Myosin-Filamenten eines Individuums ist die aktive Spannung der Muskulatur somit abhängig von der Verkürzungsmöglichkeit der Sarkomere. Die höchste aktive (isometrische) Spannung kann der Skelettmuskel aus einer Sarkomerlänge von ca. 2 – 2,2µm heraus entwickeln (71, 127). Bei einer Sarkomerlänge von nur wenigen µm darunter vermag der Muskel nur noch einen Bruchteil dieser Spannung aufzubringen. Sowohl verkürzte als auch zu stark gedehnte Muskulatur lässt eine geringere Umsetzung in Kraft erreichen (127). Durch überdehnte und dadurch gelängte Muskulatur wurde davon ausgegangen, dass die Gelenkmobilität steigen und die Laufökonomie vermindert würde. Ein negativer Einfluss von dauerhaftem Stretching auf die Laufökonomie und damit letztendlich auch auf Laufleistung hat sich jedoch nicht bestätigt. Allerdings konnte auch keine positive Änderung vermerkt werden (105).

Bei verkürzter Muskulatur spielt nicht nur die Sarkomerlänge eine Rolle, sondern auch die Tatsache, dass die Durchblutung in entspanntem Gewebe besser funktioniert. So zeigte eine bioptische Untersuchung von Muskelgewebe direkt nach Beanspruchung unregelmäßige Z-Scheiben und eine Hyperkontraktion der Muskulatur (73).

#### **- Abweichungen der Wirbelsäulenform**

Haltung ist eine Leistung der Rückenmuskulatur, welche die Anpassung an wechselnde mechanische Anforderungen ermöglicht. Kraftminderungen der Muskulatur (z.B. unausgewogenes Trainieren der einzelnen Muskelgruppen) wirken sich daher zunächst auf die Wirbelsäulenhaltung, auf Dauer aber auch auf die Wirbelsäulenform aus (106). Bei Abweichungen der Wirbelsäulenhaltung in der sagittalen Ebene sind die

physiologischen Grundvoraussetzungen (optimale Ausrichtung der Zwischenwirbelgelenke, ausgeglichene Muskelkraft) nicht mehr vollständig gegeben und könnten so zu Einschränkungen der Beweglichkeit führen. Es ist jedoch die Anforderung an die Wirbelsäule beim Laufen, durch Rotation und Lordosierung unterstützend mitzuwirken.

#### - Fußdeformitäten

Eine ideale Fußform ist nicht exakt definierbar, zumal viele Menschen mit Fußdeformitäten ein Leben lang beschwerdefrei bleiben (106). Ob Fußdeformitäten den Läufer beeinflussen, ist mehrfach im Sinne von Verletzungsneigung untersucht worden (42, 63, 143). Ebenso besteht durch Laufen ein erhöhtes Risiko, sowie Senk- als auch Spreizfüße zu entwickeln (70). Bezüglich eines Vergleiches von Fußdeformitäten und Laufleistung jedoch fanden sich bei ehemaligen, sehr erfolgreichen Marathonläufern keine signifikanten Deformitäten bzw. sogar überraschend gute Fußgewölbe (92, 107).

Hypothesen:

- a) Läufer mit verkürzter Muskulatur bringen gegenüber Sportlern ohne Verkürzung geringere Laufgeschwindigkeiten auf.
- b) Orthostatische Veränderungen der Wirbelsäule haben einen negativen Einfluss auf Laufleistungen.
- c) Da sich voraussichtlich zahlreiche Senk- und Spreizfüße unter den Läufern, v.a. unter denjenigen mit hohem Trainingsalter, finden, ergibt sich kein Unterschied in den Laufleistungen.
- d) Die besten unter den Läufern, zumindest aber unter den Marathonläufern, haben keine Fußdeformitäten.

### **1.2.6 Trainingsdaten**

Die in den obigen Teilkapiteln beschriebenen Adaptationsvorgänge finden im Laufe von Wochen, teils auch im Laufe von Jahren statt. Studien, die den Einfluss des Trainingsalters (Anzahl an Jahren des Trainings) bei Langstreckenläufern

berücksichtigten, konnten einen signifikanten Zusammenhang von Trainingsalter und Laufleistung beschreiben (8, 9, 19, 89). Manche Studien erfassten das Trainingsalter für die Distanzen 10km bzw. Marathon sogar als eines der Merkmale mit der besten Vorhersagekraft für Laufleistungen (8, 9, 89).

Ähnliches gilt für den Trainingsumfang: je mehr Kilometer pro Woche („Wochenkilometer“) gelaufen werden, desto besser ist die Laufleistung (9, 13, 16, 48, 89, 94, 125). Ebenso wird dem Einfluss der Wochenkilometer mit die beste Vorhersagekraft für Langstreckenläufe bescheinigt (8, 16, 89). Absolut gesehen fanden Scrimgeour et al. (125) bei Läufern, die mehr als 100km pro Woche trainieren, signifikant bessere Marathonzeiten als bei denjenigen, die weniger als 100km pro Woche laufen.

Bei hochtrainierten Distanzläufern scheint dies allerdings nicht unbegrenzt ausbaubar zu sein. Eine Steigerung des Trainingsumfangs (im Sinne von Zeit) führt früher oder später zu einer Stagnation der Ausdauerleistung (77, 79, 80) und sogar zu einer Verschlechterung der Maximalleistung (77, 80, 81). Verde et al. (140) vermerkten bei einer Trainingsumfangssteigerung um 38% eher Müdigkeit als bessere Laufleistungen.

Im Gegensatz dazu scheint eine Steigerung der Trainingsintensität durchaus verbesserte Leistungen nach sich zu ziehen (3, 77, 80, 81). Dementsprechend bewirkt eine Reduzierung des Trainingsumfangs keine Leistungsverschlechterung (55, 56), eine Reduktion der Trainingsintensität tut das jedoch sehr wohl (93). Weiterführend wurde für eine befristete (7-28 Tage) Reduzierung des Trainingsumfangs – bei gleichbleibender Trainingsintensität – sogar eine Leistungsverbesserung beschrieben (57). Welches Trainingsschema optimal wäre, um sich nach intensivem Training vor einem Wettkampf zu erholen, ist noch nicht ganz verstanden worden. Es scheint jedoch eher die Trainingsintensität als der Trainingsumfang beibehalten werden zu müssen, um Laufleistung zu steigern bzw. zu erhalten (72).

Trotz und mitsamt der Erkenntnisse für hochtrainierte Läufer ergeben sich die Hypothesen:

- a) Laufleistungen sind auf sämtlichen Distanzen besser, je länger (in Jahren) und
- b) je mehr (in Wochenkilometern) trainiert wird.

### **1.3 Untersuchungsziele**

Aus diesen Überlegungen leiten sich folgende Fragen ab:

Welche der genannten Einflüsse spielen für die Laufleistung eine Rolle?

Was beeinflusst die Leistung auf der einen Distanz mehr als auf der anderen?

Ist die angewandte Methode ein adäquates Mittel für Vorhersagerechnungen multifaktoriell bedingter Merkmale?

## **2 Untersuchungsgut und Methode**

### **2.1 Untersuchungsgut**

Die in die Studie einbezogenen Laufsportler stammen aus dem Freizeit- bis Hochleistungsbereich und sind während der vergangenen zehn Jahre (1991 bis 2000) in der Poliklinik der Medizinischen Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Sportmedizin, vorstellig gewesen. Auf den Grund der Vorstellung wurde dabei keine Rücksicht genommen. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich in der Mehrzahl der Fälle um routinemäßige Sporttauglichkeitsprüfungen handelte, d.h. dass die Sportler in gutem Gesundheitszustand untersucht wurden. Auswahlkriterien für eine Aufnahme in die Studie gab es im eigentlichen Sinne nicht; es wurden all diejenigen Personen einbezogen, die ihre Bestzeiten auf den untersuchten Distanzen angeben konnten.

Ausgewertet wurden 416 Akten - entspricht Untersuchungsterminen - von 320 Personen. Ein Teil der Personen wurde über die Jahre wiederholt vorstellig, so dass zur selben Untersuchung mehrere Messwerte vorlagen. In diesen Fällen gingen jeweils die Mittelwerte aus den erhobenen Messwerten ein, d.h. es wurde mit  $n = 320$  Fällen kalkuliert und nicht mit  $n = 416$ .

### **2.2 Untersuchungsmethoden**

Zur Auswertung der Daten vorliegender Studie wurden zunächst die Organsysteme einzeln abgehandelt, um die in Kapitel 1.2 aufgestellten Hypothesen zu belegen oder zu widerlegen. Danach wurden alle Merkmale zusammen unter Zuhilfenahme der schrittweisen multiplen Regression betrachtet, um die Faktoren mit der größten Einflussnahme zu ermitteln.

### 2.2.1 IAS

Die IAS ist definiert als die höchste Leistung, an welcher die Blutlaktatkonzentration während längerer Beanspruchung noch konstant bleibt (7, 95). Sie errechnet sich aus der Blutkonzentration von Laktat an der Laktatschwelle plus  $1,5\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  Laktat (28, 33, 54). Die Laktatschwelle stellt dabei diejenige Blutlaktatkonzentration dar, ab welcher das Laktat im Blut erstmals ansteigt. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung.

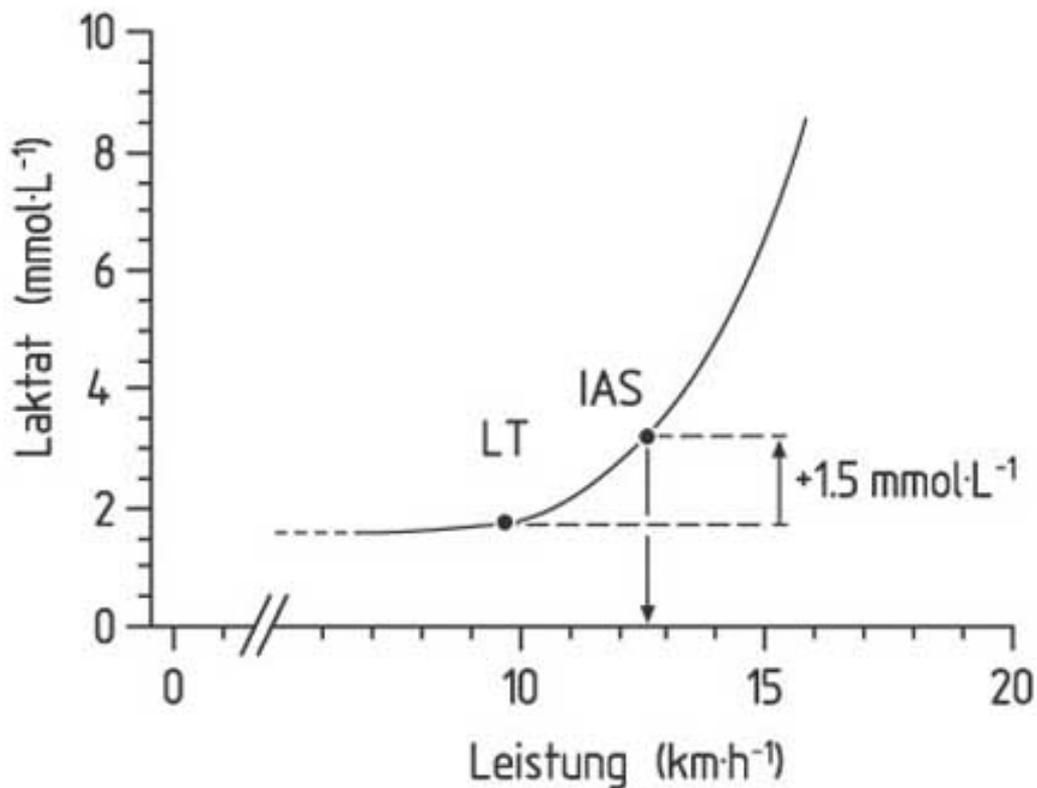


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bestimmung der IAS. LT = Laktatschwelle.

Zur Messung der Laktatkonzentration wurde auf dem Laufband im sogenannten Mehrstufentest arterialisiertes Kapillarblut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen abgenommen und enzymatisch (Gerät EBIO plus, Eppendorf) bestimmt. Diese Messwerte wurden gegen die erbrachte Leistung in der sogenannten Laktatleistungskurve graphisch dargestellt und daraus die IAS bestimmt (siehe

Abbildung 1). Für einen direkten Vergleich von IAS und Laufleistungen wurde erstere ebenfalls in Geschwindigkeit umgerechnet.

### **2.2.2 Alter und Anthropometrie**

Die Körperhöhe wurde beim aufrecht stehenden Patienten ohne Schuhe an einer Messlatte (Seca) auf 0,5 Zentimeter genau am Vertex (=höchster Punkt in der Mediansagittalebene; (12) abgelesen.

Die Messung des Körpergewichts erfolgte auf einer Balkenwaage (Seca) mit einer Genauigkeit von 0,1 kg.

Der Body-Mass-Index (BMI), auch Kaup-Index oder Körpermassen-Index genannt, wurde aus diesen beiden Messwerten anhand der Formel:  $BMI = \text{Körpergewicht [kg]} : \text{Körperhöhe [m]}^2$  errechnet (12). Der BMI stellt ein Beurteilungskriterium für Übergewicht bei Erwachsenen dar. Ein Index von 20-24,9  $\text{kg/m}^2$  entspricht dem Normalgewicht (nach: American College of Sports Medicine).

Zur Ermittlung des Körperfettanteils diente die Hautfaltenmessung mit dem Lange Skinfold Caliper (Cambridge Scientific Ind.). Die Dicke der subkutanen Fettschicht wurde als Gewebefalte an drei unbedeckten Körperstellen gemessen. Das Gewebe wurde hierfür über der Muskulatur gefasst und mit dem Daumen und Zeigefinger zu einer Falte zusammengeschoben. Die Dicke der abgehobenen Falte wurde tangential mittels des Hautfaltenmessers bestimmt, wobei von den Backen des Messgerätes ein Druck von  $10\text{g/mm}^2$  ausgeübt werden sollte (12). Es wurde jeweils die Hautfaltendicke auf der Rückseite des Oberarms über dem M. trizeps, am Rücken in der Medioclaviculärlinie direkt unterhalb der Skapula, und am Bauch suprailiackal gemessen. Aus der Summe der Hautfaltendicken wurde mittels von Parizkova und Buzkova erstellten Normogrammen der Körperfettanteil in Prozent bestimmt (12).

### **2.2.3 Herz**

Für die Ermittlung der Herzmesswerte wurde die von Dickhuth vorgeschlagene Methodik zur echokardiographischen Herzgrößenbestimmung angewandt (32).

Während Septumdicke, Wanddicken und Aortenwurzel direkt abgemessen werden konnten, musste das Herzvolumen (HV) indirekt errechnet werden. Dazu wurden im zweidimensionalen Modus jeweils der Enddiastolische Durchmesser in der Papillarmuskel- (EDDp) und der Mitralklappenebene (EDDm) gemessen. Mit der Formel (1) wurde daraus das Enddiastolische Volumen (EDV [ml]) errechnet. Aus dem EDV wiederum konnte das Gesamtherzvolumen entsprechend der Herzvolumenbestimmung nach Mußhoff und Reindell, Formel (2), berechnet werden (104). Der Standardschätzfehler für die Herzvolumenbestimmung (EDV) liegt bei 7% (32).

Um eine Beziehung zwischen Körpergewicht und Herzvolumen herzustellen, wurde das relative Herzvolumen nach Formel (3) berechnet.

Die Ruhe-Herzfrequenz wurde sitzend vor dem Laufbandtest mittels 12-Kanal-EKG (PPG Hellige, EK56, Cardioprom S) gemessen.

(1)	$EDV [ml] = [(EDVm/2)^2 \times 0.785 + (EDDp/2)^2 \times 0.432] \times 2L4$
(2)	$HV [ml] = 6.25 \times EDV + 20$
(3)	$Relatives HV [ml/kg] = HV [ml] / \text{Körpergewicht [kg]}$

**Formeln zur Herzgrößenbestimmung. L4 = Längsdurchmesser im 4-Kammer-Blick.**

#### **2.2.4 Lunge**

Die Lungenfunktionsparameter Vitalkapazität (VC), forcierte Vitalkapazität (FVC) und forcierte Einsekundenkapazität (FEV1) wurden spirometrisch (Fa. Vitalograph, „Pulmonary Functions Resultator“) gemessen. Die Vitalkapazität der Lunge beschreibt das Volumen, welches nach maximaler Inspiration maximal ausgeatmet werden kann. Zur Ermittlung der forcierten Vitalkapazität wurde das maximale Volumen forciert ausgeatmet. Die forcierte Einsekundenkapazität schließlich stellt diejenige Volumenmenge dar, die nach tiefer Inspiration innerhalb der ersten Sekunde maximal ausgeatmet werden kann (4, 108, 117, 138).

Die relative Vitalkapazität (Prozent vom Sollwert) wurde nach den Standards der Europäischen Gesellschaft für Stahl und Kohle berechnet (113).

### **2.2.5 Orthopädie**

Das Vorliegen verkürzter ischiocruraler Muskulatur wurde passiv durch den Untersucher festgestellt: Die zu untersuchende Person lag in Rückenlage in Neutral-Null-Stellung. (Arme und Beine liegen flach auf der Unterlage). Der Untersucher führte eine passive Hüftbeugung eines Beines bis 90° durch, das Kniegelenk blieb dabei vollständig gestreckt. Blieb das gegenüberliegende Bein ohne jegliche Flexion des Hüft- und Kniegelenkes auf der Unterlage, so lag keine Verkürzung der rückseitigen Oberschenkelmuskulatur des angehobenen Beines vor. Gelang es der untersuchten Person nicht, das gegenüberliegende Bein flach auf der Unterlage zu belassen, so wurde der Befund der verkürzten ischiocruralen Muskulatur erhoben.

Wirbelsäulenfehlhaltungen wurden durch Inspektion erfasst. Beim stehenden, von der Seite inspizierten Patienten wurde festgestellt, ob ein Rundrücken mit vermehrter Brustkyphose, ein Flachrücken mit verminderter Brustkyphose und verminderter Lendenlordose, oder ein Hohlkreuz mit vermehrter Lendenlordose im Vergleich zu entsprechenden Standards vorlag (10, 15).

Fußdeformitäten wurden ebenfalls inspektorisch erfasst. Beim Hohlfuß ist das Längsgewölbe des Fußes erhöht, während dieses beim Senkfuß abgeflacht ist. Der Knickfuß bezeichnet eine X-Stellung der Ferse und geht oft mit einem Senkfuß einher. Knick- und Senkfuß wurden durch einen Funktionstest verifiziert, bei dem der Patient in den Zehenspitzenstand geht. Bei echtem Knick- bzw. Senkfuß ist keine Korrektur nachweisbar. Der Spreizfuß, die häufigste erworbene Fußdeformität, bezeichnet ein Absinken des Quergewölbes und zeigt sich in einer Verbreiterung des Vorfußes sowie einer vermehrten Beschwielung im Bereich des Quergewölbes (91).

### **2.2.6 Trainingsdaten**

Die Trainingsdaten (Wochenkilometer und Trainingsalter) wurden den persönlichen Angaben der Läufer entnommen.

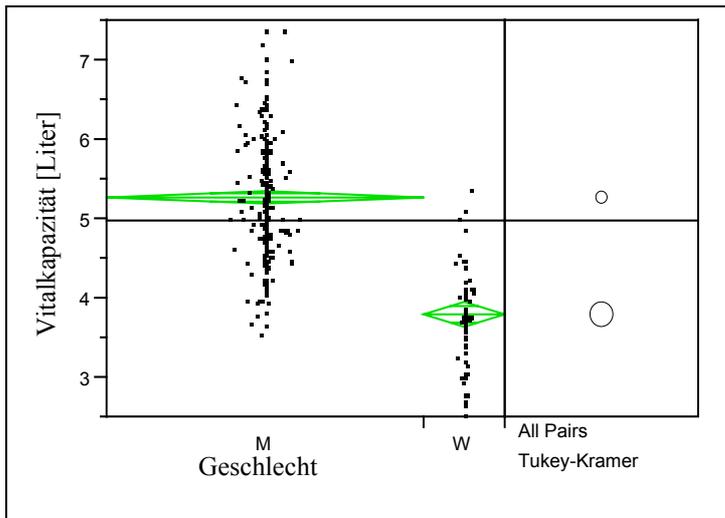
## **2.3 Übersicht über die statistischen Verfahren**

Die Rohdaten wurden mit dem Statistik- und Grafikprogramm Jmp® (SAS Institute, Cary, USA) bearbeitet. Für alle Parameter wurden arithmetisches Mittel, Standardabweichung, Minimal- und Maximalwert berechnet.

Für einen Gesamteindruck ohne die Absicht, eine statistisch relevante Aussage machen zu wollen, wurden teilweise Häufigkeitsverteilungen dargestellt.

### **2.3.1 Gruppierung, t-test, Korrelation**

Zur Gruppierung nach den Kriterien „Merkmal vorhanden“ und „Merkmal nicht vorhanden“ oder „Wert oberhalb von“ und „Wert unterhalb von“ wurden die Auswertungsmöglichkeiten (Beispiel Abbildung 2) als graphische Darstellung herangezogen. Nach Einblenden der sogenannten „means diamonds“, der Mittelwertsrauten, zeigen sich Rauten, welche den Bereich des 95%-Vertrauensintervalls – auch Konfidenzintervall genannt – angeben. Die horizontale Linie innerhalb der Rauten markiert den Mittelwert der Gruppe. Die Länge der Mittellinie und damit die Breite der Raute verhalten sich proportional zur Gruppengröße.



**Abbildung 2: Vergleich von Geschlecht und Vitalkapazität der Lunge. M = Männer, W = Frauen. Angabe der Signifikanz durch Vergleichskreise nach Tukey-Kramer.**

Die rechts eingeblendeten Vergleichskreise lassen erkennen, ob der Unterschied statistisch signifikant ist. Position und Größe der Kreise beruhen auf dem Tukey-Kramer HSD (honestly significant difference) -Test. Das Mindestmaß an Unterschied, das für eine statistische Signifikanz benötigt wird, ist der LSD (least significant difference) (62). Kreise, die einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen darstellen, berühren sich entweder nicht (siehe Abbildung 2) oder nur so weit, dass ihre Tangenten im Schnittpunkt einen Winkel von weniger als 90 Grad bilden. Überschneiden sich die Kreise jedoch weiter, so dass der Winkel größer als 90 Grad beträgt, oder befinden sie sich ineinander, so liegt kein signifikanter Unterschied vor. Ein Winkel von genau 90 Grad stellt eine grenzwertige Signifikanz dar.

Der t-Test (Signifikanztest) berechnet das Signifikanzniveau und gibt dieses als Irrtumswahrscheinlichkeit mit dem P-Wert an. Der t-test deckt als äußerst trennscharfer Test bereits bei geringem Stichprobenumfang signifikante Unterschiede auf. Voraussetzung für einen gültigen t-Test ist die annähernde Normalverteilung der Messwerte, wobei auch leichte bis mittlere Abweichungen von der Normalverteilung toleriert werden (137).

Für die in dieser Studie aufgestellten Hypothesen diente das Signifikanzniveau der Verwerfung oder Bestätigung der Hypothesen. P-Werte von unter 1% ( $p < 0,01$ ) wurden als statistisch signifikant angesehen (137). Irrtumswahrscheinlichkeiten von weniger als

0,0001 ( $p < 0,0001$ ) drückten eine an Sicherheit grenzende Wahrscheinlichkeit dafür aus, dass das Testergebnis richtig war.

Die Korrelationsanalyse diene als Ausgangspunkt für weitere Analysen (14, 130). Es muss vor allem bei niedrigen Korrelationskoeffizienten beachtet werden, dass auch ein nicht linearer Zusammenhang bestehen könnte (14). Um dies zu unterscheiden, wurden teilweise graphische Darstellungen mit Punktwolken angewandt.

Um Unterschiede zwischen den Korrelationskoeffizienten zu erkennen, wurde jeweils das 95%-Konfidenzintervall durch Fisher-z-Transformation ermittelt. Bleibt das 95%-Konfidenzintervall positiv, so ist dies ein Zeichen dafür, dass die Vorhersage sehr wahrscheinlich zutrifft.

Mit Ausnahme von Signifikanzangaben wurden errechnete Werte auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet.

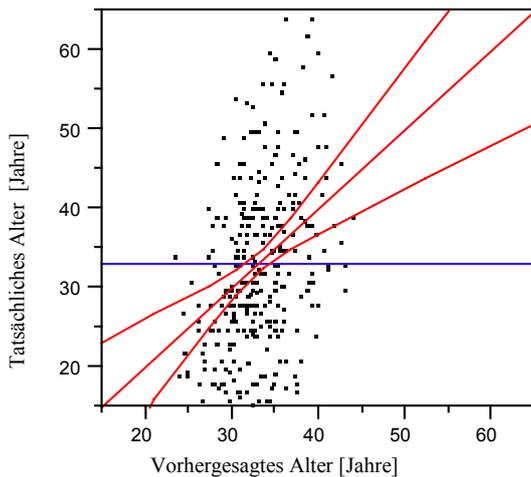
### **2.3.2 Regression**

Das Wort Regression, von lateinisch „regredi“, bedeutet „Rückschritt, auf etwas oder jemanden zurückgehen“ (137).

Um die Regressionsgerade für Vorhersagezwecke heranziehen zu können, muss ein möglichst großer Zusammenhang zwischen dem Merkmal, das vorhergesagt werden soll, und jenem, welches der Vorhersage dient, bestehen. Die unabhängige Variable  $x$  ist die gegebene Größe, in Abhängigkeit derer Werte vorhergesagt werden. Das Konfidenzintervall gibt den Bereich an, in welchem mit 95%iger Wahrscheinlichkeit der vorherzusagende Wert liegen wird.

Die einfache lineare Regression zieht lediglich ein Merkmal für die Vorhersage eines anderen heran. Geht man jedoch davon aus, dass ein Messwert durch den Einfluss mehrerer unabhängiger Merkmale zustande kommt, so hilft die multiple lineare Regressionsanalyse weiter. Sie berücksichtigt beliebig viele Merkmale für die Vorhersage eines Messwertes.

Zunächst wurden in der sogenannten schrittweisen linearen Regression aus allen zu berücksichtigenden Variablen diejenigen berechnet, welche den größten Zusammenhang zum Ergebnis aufwiesen. Als Eingangswahrscheinlichkeit wurde ein Wert von  $p < 0,25$  gewählt.



**Abbildung 3: Beispiel für multiple lineare Regression. Darstellung des Vorhersagediagramms.**

Im nächsten Schritt wurde aus den ermittelten Werten die tatsächliche Vorhersage regressionsanalytisch errechnet. Im Graphen (siehe Abbildung 3: als Beispiel Vorhersage des Alters aus Blutbild-Werten. Eingegangen sind Hämoglobin, Hämatokrit, MCH und MCHC) sind entlang der Ordinate die tatsächlich gemessenen Werte aufgetragen. Entlang der Abszisse finden sich die Werte, wie sie vorhergesagt werden. Ideal wäre, wenn die Punktwolke einer Geraden mit 45 Grad Steigung entspräche, so dass für jeden Wert  $y$  genau der selbe Wert  $x$  vorhergesagt würde. Die gebogenen Linien ober- und unterhalb der angezeigten Geraden zeigen den Bereich des Konfidenzintervalls von 95%. Durch die Punktwolke zieht sich weiterhin eine horizontale Linie, welche den Mittelwert markiert. Kreuzen die Linien des Konfidenzintervalls die Mittelwertlinie, so ist die Vorhersage signifikant. In Zahlen ausgedrückt wird Signifikanz auch hier anhand des P-Wertes angegeben. Im aufgeführten Beispiel ist  $p < 0,001$ .

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Daten und Messwerte

Erhoben bzw. errechnet wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Daten. Dabei ist zu erwähnen, dass – v.a. was die Echokardiographie des Herzens betrifft – nicht in jeder Akte jeder Messwert zu finden war (siehe Spalte „Anzahl n“ in Tabelle 1).

	Anzahl n	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
<b>Untersuchungstermine</b>	416	-	-	-
<b>Geschlecht</b>	256 64	-	-	Männer Frauen
<b>Laktat an der Laktatschwelle (La(LT))</b>	320	1,42	0,64	Mmol · l <sup>-1</sup>
<b>Individuelle Anaerobe Schwelle (IAS)</b>	320	2,92 (4,01)	0,64 (0,53)	Mmol · l <sup>-1</sup> (m · s <sup>-1</sup> )
<b>Alter</b>	319	33,00	10,25	Jahre
<b>Körpergröße</b>	320	175,55	8,04	Zentimeter
<b>Körpergewicht</b>	320	67,20	9,14	Kilogramm
<b>Körperfettanteil</b>	320	11,13	6,38	Prozent
<b>Body-Mass-Index (BMI)</b>	320	21,73	1,98	kg/(m) <sup>2</sup>
<b>Bestzeiten im Laufen auf den Distanzen</b>				
<b>1.500 m</b>	54	251,92 (6,00)	24,02 (0,53)	Sekunden (m · s <sup>-1</sup> )
<b>5.000 m</b>	106	998,72 (5,07)	122,81 (0,56)	
<b>10.000 m</b>	215	2296,30 (4,45)	347,01 (0,64)	
<b>Halbmarathon (Hama)</b>	106	5126,76 (4,23)	814,21 (0,68)	
<b>Marathon</b>	154	11301,71 (3,82)	1764,30 (0,59)	

	Anzahl n	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
<b>Echokardiographie:</b>				
<b>Enddiastolischer Durchmesser (EDD)</b>	271	50,10	4,63	Zentimeter
<b>Endsystolischer Durchmesser (ESD)</b>	269	35,38	5,13	
<b>Aortenwurzel</b>	272	29,85	4,14	
<b>Größe des linken Vorhofes</b>	258	39,21	4,48	
<b>Herzvolumen (HV)</b>	273	861,76	161,27	
<b>Ruheherzfrequenz aus dem EKG</b>	317	53,01	9,60	Schläge pro Minute
<b>Lunge:</b>				
<b>Vitalkapazität (VC)</b>	320	4,98	0,93	Liter
<b>Soll der VC</b>	319	96,44	13,30	Prozent
<b>Einsekundenkapazität (FEV1)</b>	315	4,14	0,75	Liter
<b>Forcierte Vitalkapazität (FVC)</b>	315	4,98	0,94	Liter
<b>Orthopädische Daten:</b>				
<b>Vorliegen von:</b>				Von je 320 Personen
<b>Verkürzung der ischiocruralen Muskulatur</b>	85	-	-	
<b>Hohlkreuz</b>	43			
<b>Rundrücken</b>	106			
<b>Flachrücken</b>	11			
<b>Senkfüßen</b>	106			
<b>Spreizfüßen</b>	223			
<b>Hohlfüßen</b>	20			
<b>Knickfüßen</b>	82			

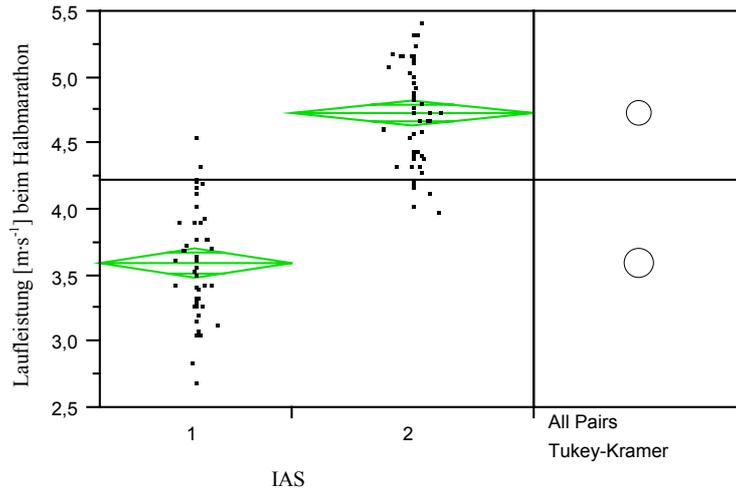
	Anzahl n	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
<b>Betriebene Sportart:</b>				
<b>Leichtathletik-Langstrecke</b>	252	-	-	Personen
<b>Leichtathletik-Mittelstrecke</b>	11			
<b>Triathlon-Langstrecke</b>	13			
<b>Triathlon-Kurzstrecke</b>	32			
<b>Freizeitsport-Jogging</b>	12			
<b>Trainingsalter</b>	320	6,26	4,98	Jahre
<b>Trainingsbeginn im Alter von</b>	319	26,77	9,58	Jahre
<b>Wochenkilometer</b>	320	72,88	31,90	Kilometer

Tabelle 1: Erhobene Daten

### 3.2 IAS

Die IAS der 320 Sportler stellt sich annähernd normalverteilt dar. Der Mittelwert der IAS beträgt  $2,92 \pm 0,64 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  bzw.  $4,01 \pm 0,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

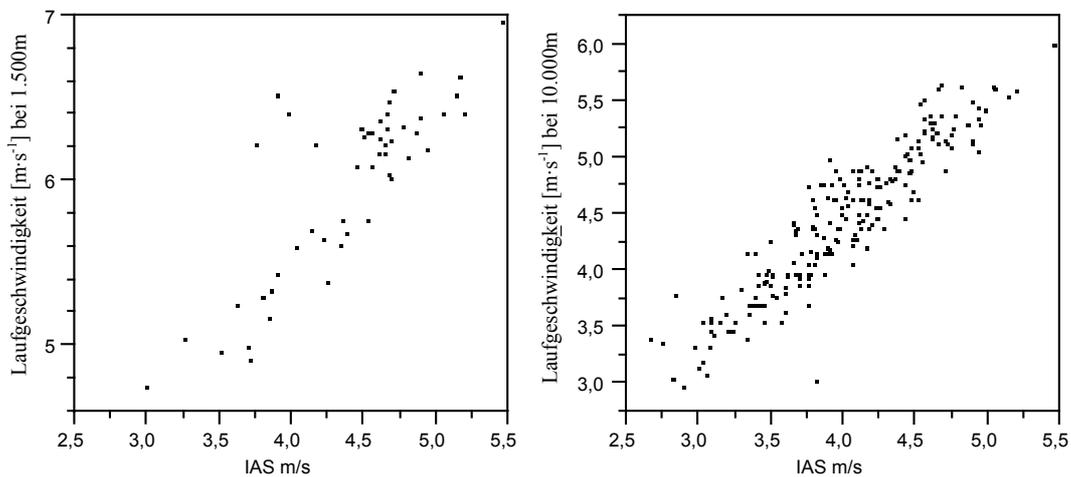
Eine Einteilung der Sportler in zwei Gruppen (Gruppe 1:  $\text{IAS} < 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , Gruppe 2:  $\text{IAS} > 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) zeigt signifikante Unterschiede in der Laufleistung. Läufer mit höherer IAS haben signifikant höhere Laufgeschwindigkeiten ( $p < 0,0001$ ). Die Spitzenzeiten werden jeweils nur von Läufern mit überdurchschnittlicher IAS bestritten. Dies ist selbst auf der Distanz 1.500m der Fall. (Siehe Abbildung 4. Die Graphen der übrigen Distanzen ähneln dem hier dargestellten).



**Abbildung 4: IAS [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] im Vergleich zur Laufleistung beim Halbmarathon [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].**

**1 = IAS <  $4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  , 2 = IAS >  $4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$**

Die Korrelationskoeffizienten von Laufgeschwindigkeit und IAS auf den Distanzen ab 5.000m betragen  $r=0,89$  und höher (5.000m:  $r=0,90$ ; 10.000m:  $r=0,92$ ; Halbmarathon:  $r=0,92$ ; Marathon:  $r=0,89$ ). Selbst bei 1.500m findet sich noch eine Korrelation von  $r=0,83$ . Die 95%-Konfidenzintervalle liegen sämtlich weit im positiven Bereich.



**Abbildung 5: Korrelationen von IAS und Laufgeschwindigkeiten.**

Beispielhaft sind hier Korrelationsgraphen (entspricht der einfachen linearen Regression) für die Distanzen 1.500m und 10.000m aufgetragen. (Abbildung 5). Die

Graphen der übrigen Distanzen ähneln demjenigen bei 10.000m. Bei 1.500m weichen die Leistungen von vier Personen von der Linie ab.

### 3.3 Alter und Anthropometrie

Bei der Betrachtung von Alter und Laufleistung ist der 1.500-m-Lauf ist der einzige, bei dem eine klare Zunahme der Laufgeschwindigkeit mit zunehmendem Alter für die unter 30jährigen zu erkennen ist (Abbildung 6). Der obere Umkehrpunkt der eingezeichneten Näherungslinie befindet sich etwa um das 30. Lebensjahr. Die Laufgeschwindigkeit nimmt danach kontinuierlich ab, wobei nur sehr wenige Läufer den Abschnitt der höheren Altersstufen repräsentieren.

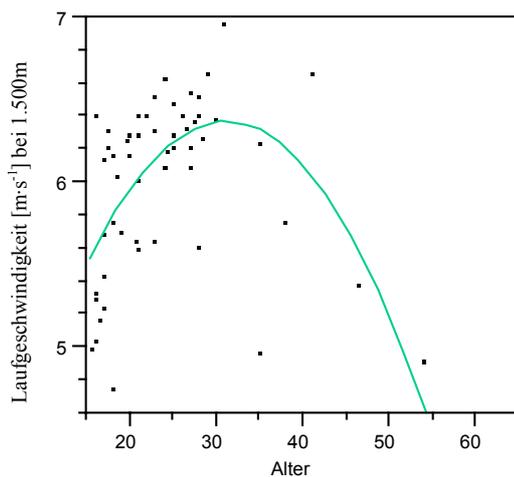
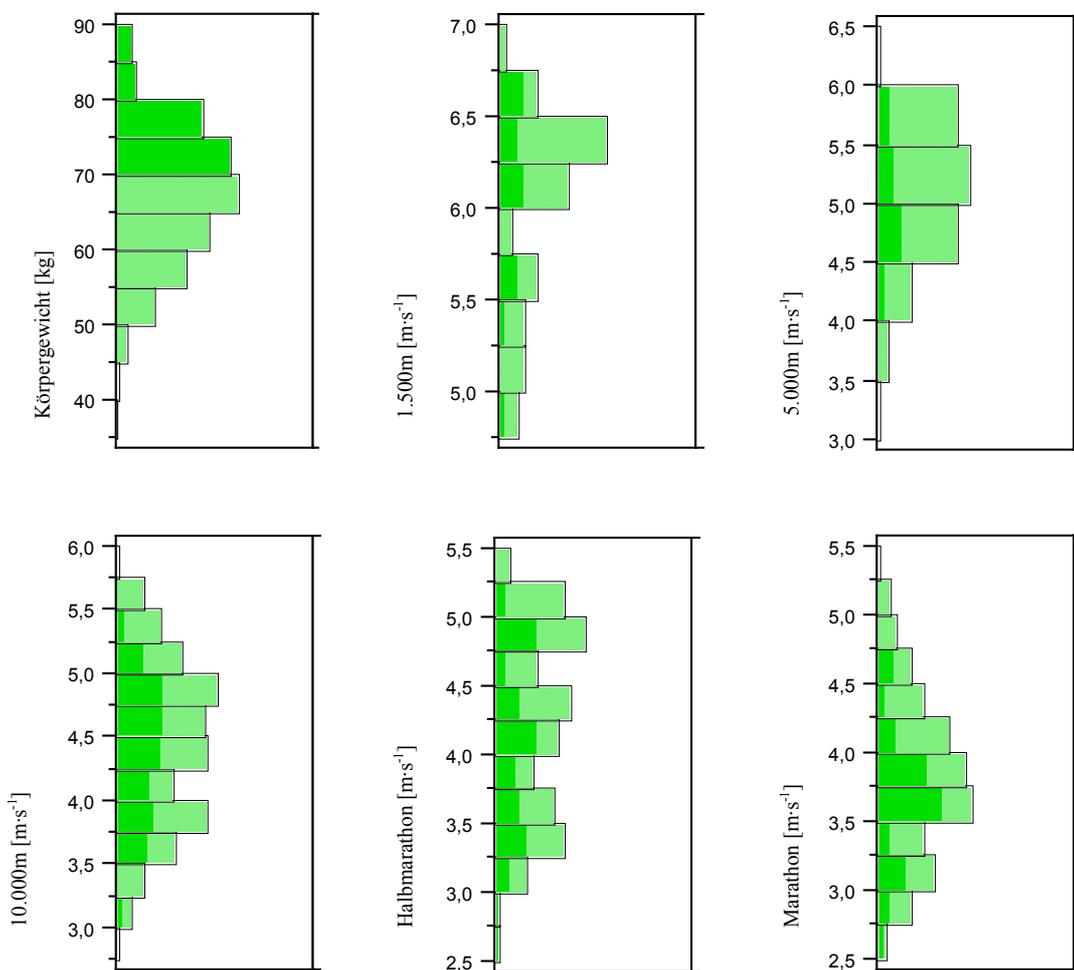


Abbildung 6: Zusammenhang von Alter [Jahre] und Laufleistung [ $m \cdot s^{-1}$ ] bei 1.500m.

Für die weiteren Distanzen ist eine Verbesserung der Laufgeschwindigkeiten im Jugend- und frühen Erwachsenenalter weniger ausgeprägt zu beobachten. Eine Abnahme der Laufleistung mit fortschreitendem Lebensalter zeigt sich jedoch deutlich. Die Höchstleistungsphase scheint früher erreicht als auf der Distanz 1.500m, eine Abnahme der Leistung ist bereits ab 25 Jahren zu verzeichnen.

Betrachtet man das Körpergewicht in Bezug auf die Laufgeschwindigkeiten, fällt die in Abbildung 7 ersichtliche gestreute Verteilung auf. Helle Flächen markieren Läufer, deren Körpergewicht bei über 70kg liegt. Diese Personen haben auf sämtlichen Distanzen sehr breit gestreute Bestleistungen; sie sind sowohl unter den über- wie auch den unterdurchschnittlichen Laufgeschwindigkeiten wiederzufinden.

Damit übereinstimmend ist nach korrelationsanalytischer Untersuchung bis auf den 1.500-m-Lauf für keine der untersuchten Distanzen eine Signifikanz gegeben. Am höchsten ist die Irrtumswahrscheinlichkeit beim Marathon mit  $p = 0,5940$ .



**Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung des Körpergewichts (links oben) und der Laufgeschwindigkeiten (1.500m bis Marathon). Dunkle Flächen markieren Läufer mit einem Gewicht von über 70kg.**

Die Untersuchung des Körperfettanteils hingegen zeigt signifikante Einzelergebnisse mit  $p < 0,0001$  für jede Distanz. Ein geringerer Körperfettanteil erbringt somit bessere Leistungen.

Der Body-Mass-Index (BMI) zeigt sich nur für den 1.500-m-Lauf mit  $p < 0,0001$  signifikant, während er es beim 5.000-m-Lauf mit  $p = 0,3008$  nicht mehr ist. Bei den Distanzen ab 10.000m jedoch errechnet sich eine erneute Signifikanz mit  $p = 0,0004$  bis  $0,0008$ .

Für die Körpergröße zeigt sich auf allen Distanzen eine positive Korrelation mit der Laufgeschwindigkeit. Beim 1.500-m-Lauf mit  $r = 0,53$  ( $n = 54$ ) ist sie am stärksten ausgeprägt (siehe Tabelle 2). Mit zunehmender Distanz nimmt die Korrelation kontinuierlich ab, erreicht beim Halbmarathon ihren Tiefstand, um dann im Marathonbereich nur wenig wieder anzusteigen. Anhand der 95%-Konfidenzintervalle wird jedoch ersichtlich, dass die Höhe der Korrelationskoeffizienten nicht von großem Zusammenhang zeugt. Für die Distanzen 5.000m und 10.000m ist das Intervall zwar im positiven Bereich. Die übrigen Distanzen reichen jedoch in den negativen Bereich und sprechen damit für einen fehlenden Zusammenhang zwischen Laufleistung und Körpergröße.

	<b>1.500m</b> n = 54	<b>5.000m</b> n = 106	<b>10.000m</b> n = 215	<b>Hama</b> n = 106	<b>Marathon</b> n = 154
<b>Körpergröße</b>	0,53 (-0,02/0,49)	0,42 (0,001/0,37)	0,36 (0,03/0,29)	0,17 (-0,12/0,26)	0,22 (-0,06/0,25)

**Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten von Laufgeschwindigkeiten und Körpergröße. In Klammern 95%-Konfidenzintervalle (-95%/+95%).**

Bei der regressionsanalytischen Untersuchung gehen auf allen Distanzen Alter, Körpergröße und Körperfett in die Vorhersageberechnungen mit ein, während BMI und Körpergewicht außen vor bleiben. Die Regressionsanalyse zeigt trotz wenig

beeindruckender Einflüsse der einzelnen Merkmale ein signifikantes Testergebnis mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit für jede Distanz von  $p < 0,0001$ .

### 3.4 Herz

Das durchschnittliche Herzvolumen der Personen dieser Studie, in die sowohl Männer als auch Frauen einbezogen sind, liegt höher als das Herzvolumen der Durchschnittsbevölkerung (siehe Tabelle 1, Kapitel 3.1; vgl. Kapitel 1.2.3). Als Maximalwert wurden 1.374ml (bei einem Mann, 25 Jahre alt) gemessen. Demgegenüber hat die Person mit dem kleinsten Volumen (Mann, 19 Jahre alt) einen Wert von 484ml.

Tabelle 3 zeigt, dass das Herzvolumen (HV) bzw. das relative Herzvolumen durchgehend die höchste Korrelation zu den Laufleistungen besitzt. EDD, Aortenwurzel und linker Vorhof weisen auch auf der Distanz 1.500m noch eine vergleichsweise hohe Korrelation auf, ebenfalls der linke Vorhof auf der Distanz 5.000m mit  $r = 0,44$ . Insgesamt finden sich beim 1.500-m-Lauf höhere Korrelationen als auf den größeren Distanzen.

Unter Einbeziehung der 95%-Konfidenzintervalle verlieren die Korrelationskoeffizienten jedoch an Vorhersagewahrscheinlichkeit. So bleiben für die Distanzen ab 5.000m absolutes und relatives Herzvolumen als einzige Parameter im positiven Bereich und deuten damit auf einen Zusammenhang zwischen Laufleistung und Herzvolumina hin. Für die Distanz 1.500m aber scheinen selbst die Herzvolumina keinen Zusammenhang zur Laufleistung aufzuweisen.

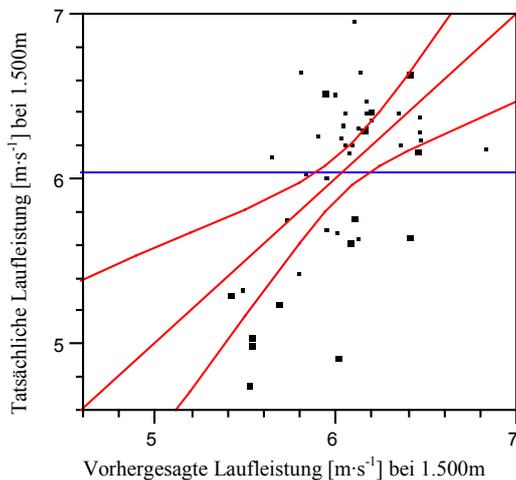
	<b>1.500m</b>	<b>5.000m</b>	<b>10.000m</b>	<b>Hama</b>	<b>Marathon</b>
<b>EDD</b>	0,45 (-0,09/0,47) n=47	0,36 (-0,04/0,36) n=92	0,30 (-0,01/0,27) n=187	0,25 (-0,10/0,31) n=88	0,26 (-0,06/0,28) n=126
<b>ESD</b>	0,30 (-0,16/0,41) n=47	0,13 (-0,15/0,26) n=92	0,05 (-0,12/0,17) n=186	0,03 (-0,20/0,22) n=87	0,06 (-0,15/0,20) n=124
<b>Aortenwurz</b>	0,44 (-0,09/0,46) n=47	0,20 (-0,12/0,29) n=92	0,24 (-0,04/0,25) n=190	0,24 (-0,11/0,31) n=88	0,24 (-0,07/0,28) n=126
<b>Linker Vorhof</b>	0,46 (-0,08/0,48) n=46	0,44 (-0,01/0,40) n=87	0,25 (-0,04/0,25) n=177	0,31 (-0,08/0,34) n=86	0,21 (-0,09/0,27) n=120
<b>HV</b>	0,57 (-0,01/0,52) n=47	0,53 (0,05/0,43) n=92	0,49 (0,09/0,36) n=189	0,46 (0,002/0,41) n=87	0,42 (0,02/0,35) n=130
<b>Relatives HV</b>	0,46 (-0,08/0,47) n=47	0,52 (0,04/0,43) n=92	0,59 (0,15/0,41) n=189	0,60 (0,09/0,47) n=87	0,54 (0,09/0,41) n=130
<b>Ruheherzfrequenz</b>	-0,24 (-0,37/0,17) n=53	-0,19 (-0,27/0,11) n=106	-0,19 (-0,22/0,05) n=215	-0,23 (-0,29/0,09) n=104	-0,27 (-0,27/0,04) n=152

**Tabelle 3: Korrelationen von Herzparametern und Laufgeschwindigkeiten. In Klammern 95%-Konfidenzintervalle (-95%/+95%).**

Untersucht man die Messwerte des Herzens hinsichtlich ihrer Fähigkeit, die Laufgeschwindigkeit vorhersagen zu können, treten dennoch zum Teil signifikante Ergebnisse zutage:

Bei der schrittweisen multiplen Regression für die Geschwindigkeit bei 1.500m werden der Endsystolische Durchmesser und das absolute Herzvolumen als vorhersagefähig in die Berechnung aufgenommen. Die Regressionsanalyse zeigt sich als signifikant. Betrachtet man jedoch die Merkmale im einzelnen, so scheint der Endsystolische Durchmesser mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von  $p = 0.6393$  kaum einen Einfluss zu

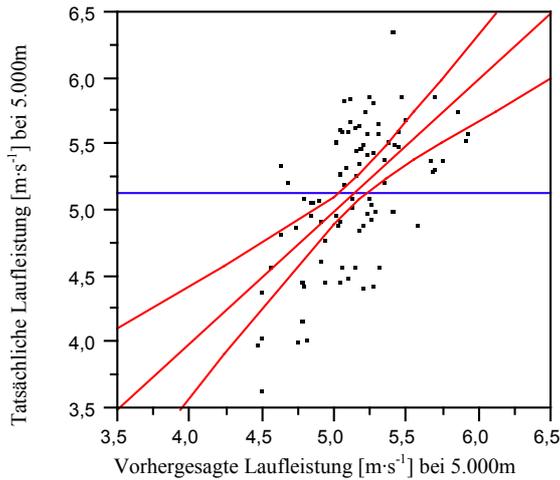
besitzen, während das Herzvolumen mit  $p = 0,0002$  immer noch signifikant ist. Interessanterweise ist jedoch das relative Herzvolumen (Herzvolumen bezogen auf das Körpergewicht) nicht in die Analyse eingegangen.



**Abbildung 8: Multiple lineare Regression. Vorhersage der Laufgeschwindigkeit von 1.500m durch Herzvolumen und ESD.**

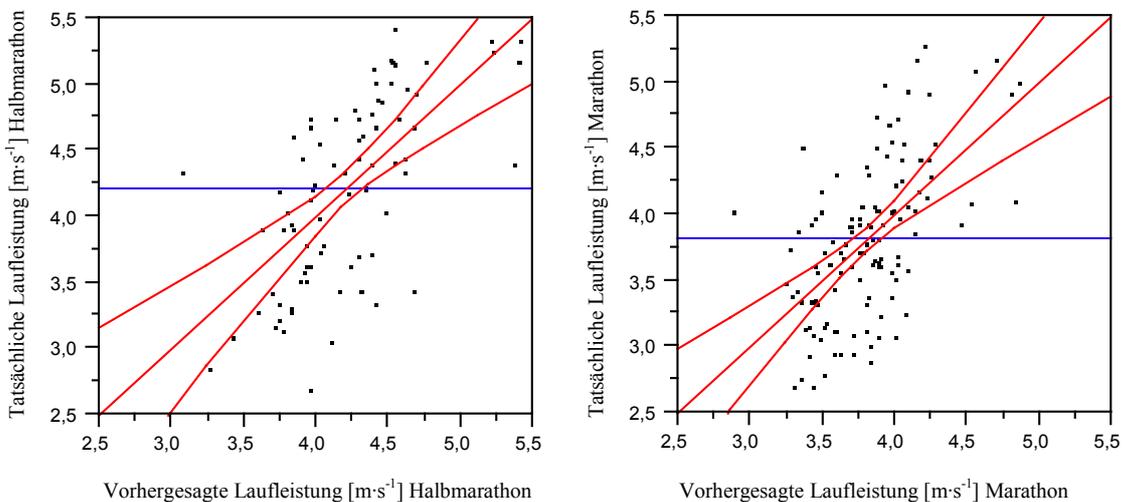
Anders sieht es für die Laufgeschwindigkeit bei 5.000m aus, bei welcher Echokardiogramme von 92 Sportlern vorliegen. Hier geht das relative Herzvolumen als wichtigster Vorhersagemesswert zusammen mit der Größe des linken Vorhofes in die Regressionsanalyse ein. Bei Einzelbetrachtung ist hier das relative Herzvolumen mit  $p < 0,0001$  ebenso signifikant wie die Größe des linken Vorhofes mit  $p < 0,0011$ . Die Gesamtvorhersage ist wie bei 1.500m signifikant (Abbildung 9).

Für die Distanz 10.000m ist wiederum das relative Herzvolumen wichtigster Vorhersageparameter. Aortenwurzel, Endsystolischer Durchmesser und absolutes Herzvolumen gehen ebenfalls ein, die Gesamtvorhersage ist mit  $p < 0,0001$  signifikant.



**Abbildung 9: Multiple lineare Regression für 5.000m. Vorhersage durch relatives Herzvolumen und Größe des linken Vorhofes.**

In der Regressionsanalyse für die Distanzen Halbmarathon und Marathon werden jeweils relatives Herzvolumen, Aortenwurzel und Enddiastolischer Durchmesser zur Vorhersage herangezogen. In beiden Fällen zeigt sich die Analyse signifikant (Abbildung 10).



**Abbildung 10: Regressionsanalytische Vorhersage für Laufgeschwindigkeiten bei Halbmarathon (links) und Marathon (rechts) aus dem Herzvolumen.**

Wie auch schon beim 10.000m-Lauf ist jeweils nur das relative Herzvolumen als Einzelkomponente signifikant (jeweils  $p < 0,0001$ ), während die übrigen eingegangenen

Werte bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,0707$  bis  $p = 0,0239$  liegen und der Enddiastolische Durchmesser als dritter eingegangener Wert beim Marathon gar eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,6018$  aufweist.

### 3.5 Lunge

Tabelle 4 gibt die Korrelationskoeffizienten für die Lungenfunktionswerte bezogen auf die Laufgeschwindigkeiten an. Hervorgehoben ist für jede Distanz die größte Korrelation.

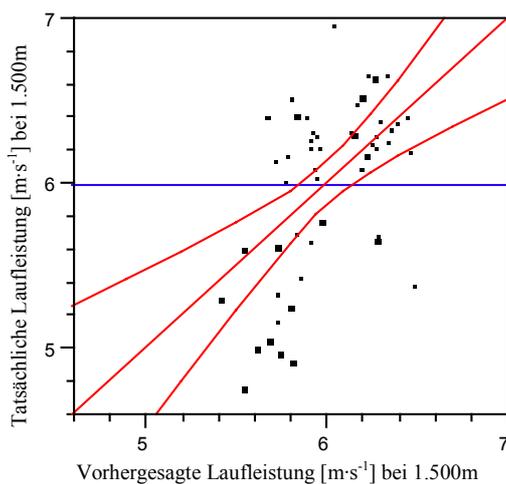
	<b>1.500 m</b> n=53	<b>5.000 m</b> n=106	<b>10.000 m</b> n=215	<b>Hama</b> n=104	<b>Marathon</b> n=150
<b>FEV 1</b>	<b>0,51</b> (-0,03/0,48)	<b>0,50</b> (0,05/0,41)	<b>0,48</b> (0,09/0,35)	0,30 (-0,06/0,32)	0,32 (-0,02/0,30)
<b>FVC</b>	0,50 (-0,04/0,47)	0,47 (0,03/0,40)	0,42 (0,06/0,32)	0,28 (-0,07/0,31)	0,35 (-0,003/0,31)
<b>VC</b>	0,46 (-0,06/0,46)	0,49 (0,04/0,40)	0,45 (0,08/0,33)	<b>0,32</b> (-0,05/0,33)	<b>0,39</b> (0,02/0,33)
<b>Relative VC</b>	-0,05 (-0,29/0,25)	0,01 (-0,19/0,20)	-0,12 (-0,19/0,08)	-0,07 (-0,22/0,16)	0,05 (-0,14/0,18)

**Tabelle 4: Korrelationen von Lungenfunktionswerten und Laufgeschwindigkeiten. Berechnet aus Laufgeschwindigkeiten [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] und Lungenfunktionswerten [Liter]. Hervorgehoben sind die größten Korrelationen jeder Distanz. In Klammern 95%-Konfidenzintervalle (-95%/+95%).**

Für die Distanzen 1.500m, 5.000m und 10.000m ist die größte Korrelation jeweils durch die Einsekundenkapazität gegeben, beim Halbmarathon und Marathon dagegen durch die Vitalkapazität, während die relative Vitalkapazität (Prozent zum Sollwert) keinen Zusammenhang vermuten lässt. Die 95%-Konfidenzintervalle zeugen trotz relativ hoher Korrelationskoeffizienten von geringer Vorhersagekraft aller Lungenfunktionsparameter für die Distanzen 1.500m und Halbmarathon. Bei 5.000m und 10.000m aber scheinen FEV1, FVC und VC einen Einfluss zu haben, und beim Marathonlauf hat nur die Vitalkapazität Vorhersagekraft.

Im Mittel hat die untersuchte Population eine Vitalkapazität von 5,0 Litern. Erhöhte Vitalkapazitäten (> 5 Liter) finden sich bei Sportlern aller Laufgeschwindigkeiten. Unter den Spitzenläufern finden sich auch Personen mit geringeren Vitalkapazitäten. Für die relative Vitalkapazität findet sich ein niedriger arithmetischer Mittelwert von  $96,44 \pm 13,30 \%$ .

In die Regressionsanalyse geht für die Vorhersageberechnung der Laufgeschwindigkeit bei 1.500m von allen drei Lungenmesswerten (VC, FEV1, FVC) nur die Einsekundenkapazität mit ein (Abbildung 11). Das Signifikanzniveau wird mit  $p < 0,001$  angegeben. Das Ausmaß der Einsekundenkapazität ist signifikant für die Leistung im 1.500m-Bereich.



**Abbildung 11: Regression der Laufleistung bei 1.500m durch die Sekundenkapazität FEV1.**

Bei der multiplen Regression für die Vorhersage von 5.000m sind FEV 1 zusammen mit der Vitalkapazität ausschlaggebend. Die Linien der Vertrauensbereiche kreuzen zwar in keinem der beiden Fälle die Horizontale des Mittelwertes, doch wird in der Gesamtvorhersage die Irrtumswahrscheinlichkeit mit  $p < 0,0001$  angegeben.

Auch auf der Distanz 10.000m geht die FEV1 zusammen mit der VC in die multiple Regression ein. Die Irrtumswahrscheinlichkeiten sind mit  $p = 0,0005$  für FEV1 und

$p = 0,0324$  für die VC bereits höher. Das Gesamtmodell allerdings ist mit  $p < 0,0001$  weiterhin signifikant.

Demgegenüber spielt auf den Strecken Halbmarathon und Marathon nur noch jeweils die Vitalkapazität, die aber ebenfalls signifikant ist, eine Rolle: Beim Halbmarathon errechnet die Vorhersage eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,0006$  und beim Marathon eine von  $p < 0,0001$  (Graphen der Regressionsanalysen von 5.000m bis Marathon nicht dargestellt).

## **3.6 Orthopädie**

### ***3.6.1 Ischiocrurale Muskulatur***

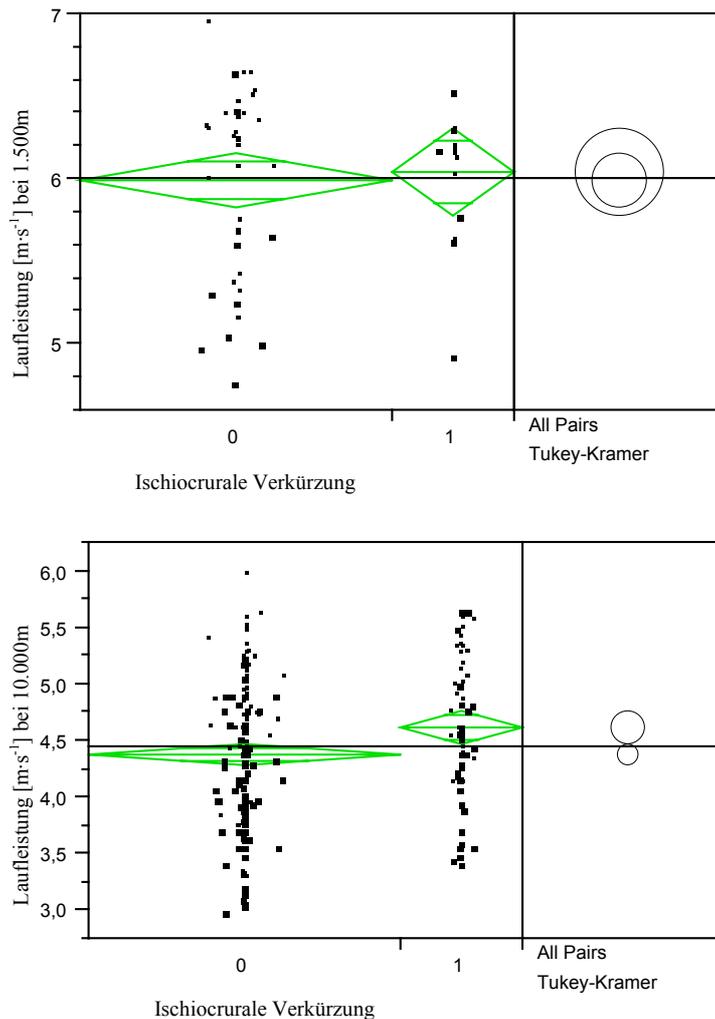
Für die Analyse verkürzter ischiocruraler Muskulatur werden jeweils die Mittelwerte der Laufgeschwindigkeiten von Läufern mit und ohne diesem Merkmal betrachtet. Der Vergleich der errechneten Mittelwerte bringt für alle fünf Distanzen zutage, dass diejenigen Sportler, deren Muskulatur verkürzt ist, keine schlechteren Laufzeiten aufweisen. Im Gegenteil, sie laufen im Durchschnitt auf sämtlichen Distanzen sogar besser als jene ohne Verkürzung (Tabelle 5).

	1.500 m	5.000 m	10.000 m	Hama	Marathon
<b>n = Anzahl Personen ohne / mit Verkürzung</b>	39 / 15	75 / 31	155 / 60	76 / 30	114 / 40
<b>Laufleistung, ohne Verkürzung</b>	5,99 (0,58)	5,01 (0,59)	4,38 (0,63)	4,15 (0,67)	3,79 (0,58)
<b>Laufleistung, mit Verkürzung</b>	6,04 (0,40)	5,22 (0,45)	4,63 (0,61)	4,45 (0,68)	3,93 (0,60)
<b>Differenz</b>	0,05	0,21	0,25	0,31	0,15
<b>Prob &gt; [t] (t-Test)</b>	0,76	0,079	0,01	0,04	0,17

**Tabelle 5: Vergleich von Laufgeschwindigkeiten bei Sportlern mit und ohne verkürzter ischiocruraler Muskulatur. Angegeben sind Mittelwerte der Gesamtgruppen, Standardabweichung in Klammern. Mittelwerte, Standardabweichung und Differenz in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .**

Die Differenz zugunsten der Verkürzung beträgt bei 1.500m  $0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , was einer besseren Leistung um 0,8 % entspricht. Bei 5.000m liegt der Unterschied mit  $0,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $4,2 \%$ ) bereits um einiges höher, ebenso bei 10.000m mit  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $5,7 \%$ . Beim Halbmarathon erreicht sie ihren höchsten Wert von  $0,31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , was einer besseren Laufleistung um  $7,5 \%$  gegenüber der Gruppe ohne Verkürzung entspricht. Auf der Distanz des Marathon vermindert sich der Unterschied dann wieder auf  $0,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $4,0 \%$ ).

Der jeweils durchgeführte t-Test zeigt die Relevanz der Differenzen, graphisch dargestellt in Abbildung 12. Anhand der vergleichenden Kreise wird die knappe (bei 10.000m,  $p = 0,0105$ ) bzw. nicht vorhandene (beispielhaft die Distanz 1.500m) Signifikanz veranschaulicht.



**Abbildung 12: Vergleich der Laufleistungen von Läufern mit und ohne verkürzter ischiocruraler Muskulatur für die Distanzen 1.500m und 10.000m. 0 = Läufer ohne Verkürzung, 1 = Läufer mit Verkürzung.**

### 3.6.2 Rücken

Die häufigsten Haltungsschwächen der Wirbelsäule der untersuchten Population drücken sich als Rundrücken (thorakale Hyperkyphose) oder Hohlkreuz (lumbale Hyperlordose) aus. Von den 320 untersuchten Personen hat jede dritte einen Rundrücken (106 Personen). Ein Hohlkreuz besitzen 43 Personen, was 15,5% der untersuchten Population entsprach. Der Flachrücken kommt weit seltener vor: Er wurde lediglich in elf Fällen diagnostiziert.

In Tabelle 6 wird ein Vergleich zwischen Läufern mit und jenen ohne **Hohlkreuz** vorgenommen.

Es ergibt sich ein homogenes Bild: Auf allen Distanzen schneiden diejenigen Läufer besser ab, die ein Hohlkreuz haben.

	<b>1.500m</b>	<b>5.000m</b>	<b>10.000m</b>	<b>Hama</b>	<b>Marathon</b>
<b>Anzahl Personen ohne / mit Hohlkreuz</b>	49 / 5	92 / 14	188 / 27	90 / 16	133 / 21
<b>Laufleistung, ohne Hohlkreuz</b>	5,98 (0,55)	5,06 (0,56)	4,42 (0,63)	4,18 (0,68)	3,79 (0,58)
<b>Laufleistung, mit Hohlkreuz</b>	6,29 (0,17)	5,16 (0,60)	4,66 (0,64)	4,50 (0,68)	4,01 (0,62)
<b>Differenz</b>	0,31	0,07	0,25	0,32	0,22
<b>Prob &gt; [t] (t-Test)</b>	0,21	0,56	0,07	0,09	0,12

**Tabelle 6: Vergleich von Laufgeschwindigkeiten bei Sportlern mit und ohne Hohlkreuz. Angegeben sind Mittelwerte; Standardabweichung in Klammern. Mittelwerte, Standardabweichung und Differenz in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .**

Der t-Test ergibt für alle Strecken, vor allem aber für 5.000m mit rund 55%, nicht signifikante Unterschiede.

Der **Rundrücken** liefert ähnlich homogene Ergebnisse. Läufer mit Rundrücken sind im Durchschnitt auf allen Distanzen schneller als diejenigen ohne. Im Gegensatz zu den Daten für das Hohlkreuz ähneln sich die Gruppengrößen mit bzw. ohne Haltungsschwäche hier mehr. Extremwerte werden somit gleichmäßiger gemittelt.

Die Differenz der Laufleistungen von Läufern mit gegenüber jenen ohne Rundrücken ist größer als bei Läufern mit bzw. ohne Hohlkreuz. Wie in Tabelle 7 zu ersehen, beläuft sich die Differenz der Laufgeschwindigkeiten auf 0,16 bis  $0,28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , was im Fall

Marathon einer höheren Geschwindigkeit von 6,6 % gegenüber dem Durchschnitt der Nicht-Haltungsschwachen entspricht. Effektiv bedeutet dies, dass Marathonläufer mit Rundrücken ihr Ziel im Schnitt gut 13 Minuten früher erreichen.

Die Irrtumswahrscheinlichkeiten liegen hier niedriger als beim Hohlkreuz. Die Ergebnisse des 10.000-m-Laufes sind signifikant, die der anderen Distanzen nicht.

	<b>1.500m</b>	<b>5.000m</b>	<b>10.000m</b>	<b>Hama</b>	<b>Marathon</b>
<b>Anzahl Personen ohne / mit Rundrücken</b>	38 / 16	69 / 37	151 / 64	62 / 44	101 / 53
<b>Laufleistung, ohne Rundrücken</b>	5,96 (0,58)	5,00 (0,61)	4,37 (0,65)	4,14 (0,68)	3,74 (0,59)
<b>Laufleistung, mit Rundrücken</b>	6,12 (0,38)	5,21 (0,43)	4,64 (0,56)	4,36 (0,67)	3,99 (0,55)
<b>Differenz</b>	0,16	0,20	0,28	0,22	0,29
<b>Prob &gt; [t] (t-Test)</b>	0,30	0,08	0,003	0,10	0,01

**Tabelle 7: Vergleich von Laufgeschwindigkeiten bei Sportlern mit und ohne Rundrücken. Angegeben sind Mittelwerte der Gesamtgruppen, Standardabweichung in Klammern. Mittelwerte und Standardabweichung in m·s<sup>-1</sup>.**

Da es – wenn auch in weniger eindrucklichem Ausmaß – im Falle des Hohlkreuzes ebenfalls der 10.000-m-Lauf ist, der die größte Differenz zeigt, wird diese Distanz näher betrachtet.

	10.000m [m·s <sup>-1</sup> ]	Alter [Jahre]	Herz- volumen [ml]	Vital- kapazität [Liter]	Körper- größe [Meter]	Körper- gewicht [kg]	IAS [m·s <sup>-1</sup> ]
Weder Hohlkreuz noch Rund- rücken	4,38 (0,65)	34,18 (9,97)	849,73 (165,43)	4,87 (0,98)	174,68 (7,97)	67,39 (9,25)	3,94 (0,55)
Sowohl Hohlkreuz als auch Rund- rücken	4,80 (0,57)	32,11 (9,43)	899,61 (158,45)	5,04 (0,94)	175,55 (6,84)	65,93 (7,29)	4,25 (0,53)

**Tabelle 8: Gegenüberstellung aller 10.000-m-Läufer mit und ohne Haltungsschwäche. Angabe der Mittelwerte, Standardabweichung in Klammern.**

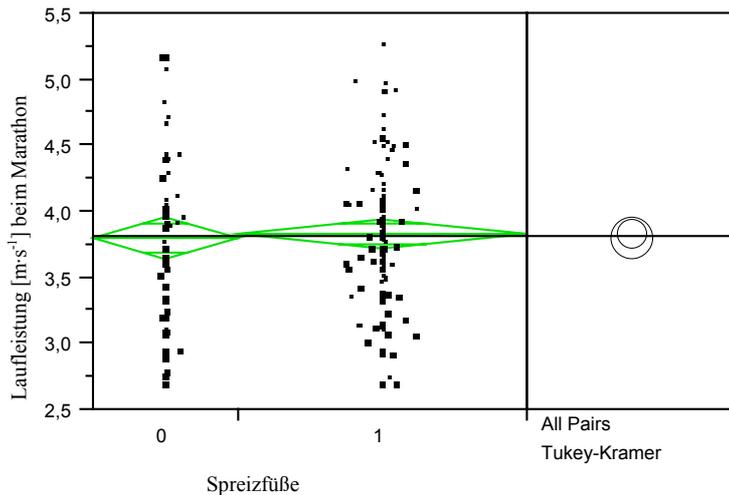
Tabelle 8 gibt einen Ausschnitt der verglichenen Daten wieder. Unter allen Läufern, von denen Bestzeiten auf 10.000m vorliegen, befinden sich 146, die weder Hohlkreuz noch Rundrücken aufweisen. Bei 22 Personen wird sowohl die eine als auch die andere Haltungsschwäche diagnostiziert. Die Tabelle zeigt, dass jene Sportler mit Haltungsschwäche durchweg weitere als günstig postulierte Eigenschaften aufweisen.

Für das Vorhandensein eines **Flachrückens** stellt sich die Lage genau umgekehrt dar: Bei Läufern mit Flachrücken werden auf sämtlichen untersuchten Distanzen geringere Laufgeschwindigkeiten beobachtet.

Läufer ohne Flachrücken erbringen bei 10.000m eine um 9,13% höhere Geschwindigkeit. Beim Marathon findet sich eine bessere Laufleistung um etwas mehr als 5%. Doch der t-Test ergibt für die Distanz 10.000m eine schwache Signifikanz von 7,54%, während die Differenz beim Marathon mit 33,63% weit von einer Signifikanz entfernt ist.

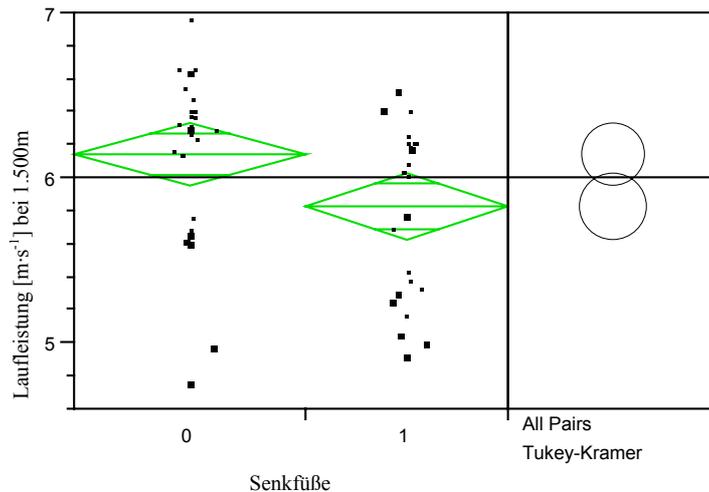
### 3.6.3 Fußdeformitäten

Die Ergebnisse von Laufgeschwindigkeiten gleichen sich sehr für Läufer mit und ohne Fußdeformitäten. Abbildung 13 gibt anhand des Spreizfußes ein Beispiel dafür. Für die anderen Distanzen und Fußdeformitäten zeigen sich die Verhältnisse vergleichbar ähnlich.



**Abbildung 13: Vergleich der Laufleistungen beim Marathon für Läufer mit und ohne Spreizfuß. 0 = Läufer ohne Spreizfüße, 1 = Läufer mit Spreizfüßen.**

Einzigste Ausnahme stellt der Senkfuß in Bezug auf die Laufgeschwindigkeit bei 1.500m dar. Mit  $p = 0,0244$  ist der Unterschied zwar nicht signifikant, zeigt aber eine Tendenz zugunsten derjenigen Läufer, die keine Senkfüße haben (Abbildung 14).



**Abbildung 14: Vergleich der Läufer mit und ohne Senkfüßen für die Distanz 1.500m. 0 = keine Senkfüße, 1 = Senkfüße.**

Die Verteilung von Fußdeformitäten, v.a. der Spreizfüße, zeigt sich gleichmäßig für gute wie auch für schlechte Läufer. Auf sämtlichen Distanzen weisen auch Läufer mit Spitzenzeiten Fußdeformitäten auf.

### 3.7 Trainingsdaten

Durchschnittlich trainieren die 320 untersuchten Läufer seit  $6,26 \pm 4,98$  Jahren. Sie legen im Mittel wöchentlich  $72,88 \pm 31,90$  km zurück. Die Häufigkeitsverteilung stellt sich jeweils mit großem Hang in den unteren Bereich dar. Gleichzeitig tauchen Extremwerte nach oben hin, wie etwa Training seit 30 Jahren oder Laufen von 200 km die Woche, auf (Abbildung 15).

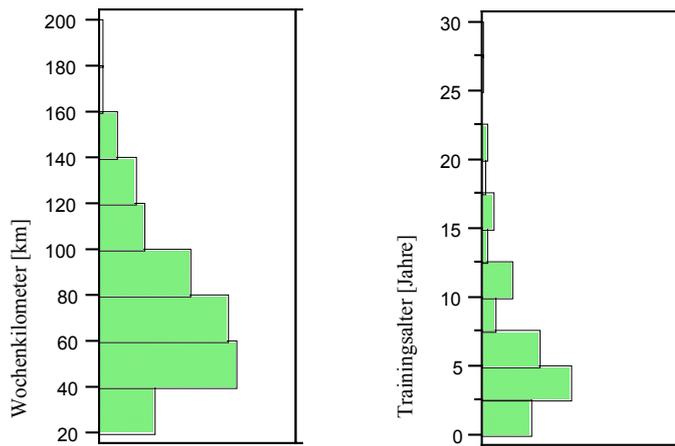


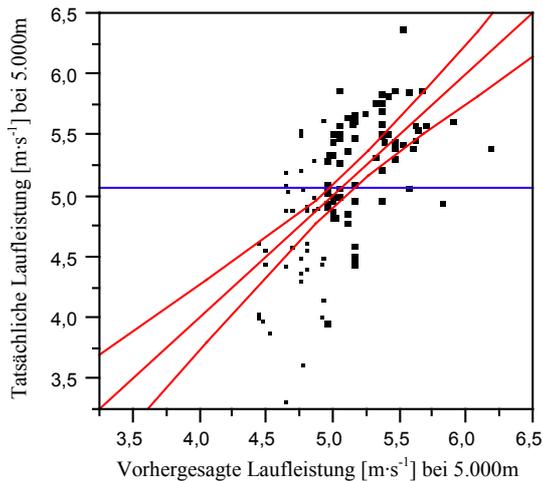
Abbildung 15: Häufigkeitsverteilungen von Wochenkilometer [km] und Trainingsalter [Jahre].

Tabelle 9 stellt eine positive Korrelation für Trainingsintensität und Laufleistung dar, aber auch eine nicht gegebene Korrelation für Trainingsalter und Laufleistung.

	<b>1.500m</b> n=54	<b>5.000m</b> n=106	<b>10.000m</b> n=215	<b>Hama</b> n=106	<b>Marathon</b> n=154
<b>Wochenkilometer</b>	0,65 (0,06/0,55)	0,62 (0,12/0,47)	0,71 (0,25/0,48)	0,76 (0,23/0,56)	0,72 (0,23/0,51)
<b>Trainingsalter</b>	0,30 (-0,14/0,39)	0,11 (-0,14/0,24)	0,04 (-0,12/0,15)	0,20 (-0,11/0,28)	0,16 (-0,09/0,23)

Tabelle 9: Korrelationskoeffizienten von Wochenkilometer bzw. Trainingsalter und Laufgeschwindigkeiten. In Klammern 95%-Konfidenzintervalle (-95%/+95%).

Mit Hilfe der Regressionsanalyse wird die Fähigkeit des Trainingsumfangs, Laufleistungen zuverlässig vorhersagen zu können, nachgewiesen. Das Trainingsalter geht bei den Wettkampfdistanzen 5.000m, 10.000m und Halbmarathon nicht in die Vorhersagerechnung mit ein. Bei 1.500m und Marathon wird das Trainingsalter zwar in die Vorhersage aufgenommen, ist aber jeweils nicht signifikant.



**Abbildung 16: Regressionsanalyse zur Vorhersage der Laufgeschwindigkeiten auf 5.000m aus Wochenkilometer.**

Abbildung 16 zeigt die Analyse am Beispiel des 5.000-m-Laufes. Das Ergebnis zeigt, dass selbst für diese Distanz, die den geringsten Korrelationskoeffizienten von Wochenkilometer und Laufleistung aufweist, eine signifikante Vorhersageberechnung möglich ist. Für die übrigen Distanzen trifft dies umso mehr zu.

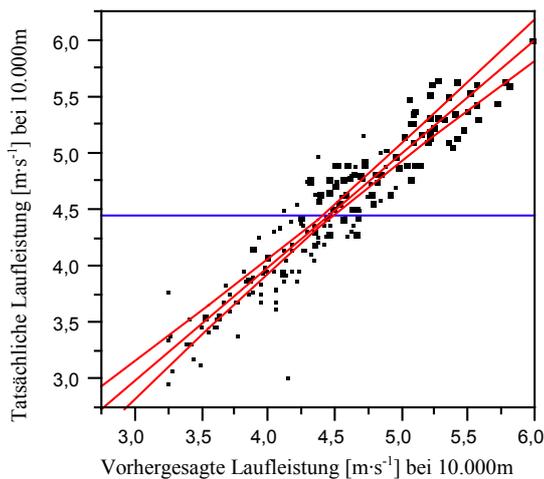
### 3.8 Regressionsanalyse aller Merkmale

Im regressionsanalytischen Verfahren, bei dem alle untersuchten Merkmale gleichzeitig einbezogen werden, zeigen sich die Ergebnisse durchweg signifikant. Die IAS spielt auf allen Distanzen die bedeutendste Rolle. In der weiteren Abstufung unterscheidet sich vor allem der 1.500-Meter-Lauf von den übrigen. Hier gelten (in abnehmender Reihenfolge) forcierte Vitalkapazität, Ruheherzfrequenz aus dem EKG, Flachrücken, Spreizfüße, Alter, Hohlkreuz und Senkfüße als weitere relevante Faktoren. Auch die Punktwolke ist weiter gestreut als sie es für die übrigen Distanzen ist (vgl. Abbildung 17).

Auf der 5.000m-Distanz ist der Anteil des Körperfettes nach der IAS der relevanteste Messwert. Mit eingegangen sind zusätzlich forcierte Einsekundenkapazität, Flachrücken, Wochenkilometer, Body-Mass-Index, Größe des linken Vorhofes, Vitalkapazität, Körpergröße und Körpergewicht.

Ab 10.000m spielen die Wochenkilometer die zweitwichtigste Rolle. Bei 10.000m sind danach forcierte Einsekundenkapazität, Körpergewicht, Hohlkreuz, Flachrücken, Herzvolumen, Herzfrequenz in Ruhe und Spreizfüße von Bedeutung.

Beispielhaft wird das Ergebnis bei 10.000m abgebildet (Abbildung 17). Wie bereits erwähnt, sehen die Graphen der übrigen Distanzen mit Ausnahme jenem bei 1.500m vergleichbar aus.



**Abbildung 17: Regressionsanalyse aller Merkmale bei 10.000m. Angaben in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .**

Beim Halbmarathon spielen nach IAS und Wochenkilometer die Körpergröße, das Trainingsalter, Spreizfüße, Alter, Aortenwurzel, Herzfrequenz in Ruhe und forcierte Vitalkapazität die bedeutendsten Rollen, während beim Marathon das Trainingsalter bereits an dritter Stelle steht. Danach kommen beim Marathon Hohlkreuz, Körpergröße, Herzvolumen, Flachrücken und Hohlfüße.

## 4 Diskussion

Beginnt man, sich mit potenziell einflussnehmenden Faktoren zu beschäftigen, drängt sich unweigerlich die Frage auf, ob nicht wesentlich mehr als nur die erhobenen Merkmale zu untersuchen gewesen wären, um dem Anspruch des Multifaktoriellen gerecht zu werden. Ernährung, Tagesform, Schlaf, psychische Verfassung, Wetter sind nur ein paar zu nennende Beispiele. Die Objektivierbarkeit ist dabei oftmals ein Problem. Die Verlässlichkeit der Angaben ist von unabdingbarer Wichtigkeit für eine objektive Auswertung. Nur so kann eine wissenschaftlich fundierte Aussage darüber gemacht werden, ob und inwiefern ein Merkmal zur Vorhersageberechnung beiträgt. Obwohl viele der weiteren Merkmale, die in die Studie mit einbezogen hätten werden können, sich für objektive Auswertungen eignen, ist doch die Verlässlichkeit nicht unbedingt gewährleistet.

Die Berücksichtigung der Ernährung beispielsweise ist dadurch erschwert, dass sich die wenigsten Läufer strikte Ernährungspläne auferlegen. Zur Erfassung der Tagesform bestehen interindividuelle Unterschiede in der Angabe, ab wann sich jemand fit fühlt und äußere Bedingungen wie Hitze, Kälte oder Luftfeuchtigkeit werden schlichtweg nicht dokumentiert.

Die Untersuchung verschiedener Organsysteme und individueller Gegebenheiten repräsentieren trotz des Nichtberücksichtigens eben erwähnter Merkmale ein breites Spektrum an Überlegungen. So wurden in der vorliegenden Arbeit diejenigen Merkmale in die Analysen einbezogen, die sich gut messen und dokumentieren lassen. Auch die Laufleistung stellt ein verlässliches Kriterium dar, da es sich um Wettkampfbestleistungen handelt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Arbeit tatsächlich der Vorgabe der multifaktoriellen Analyse erfüllt.

Von den 320 Personen wurden mit 253 knapp 80% der Sportler nur einmal untersucht. 58 Personen kamen zwei bis drei Mal, neun hingegen vier oder fünf Mal. Bei den mehrfach untersuchten Sportlern wurden teilweise neue Bestzeiten im Laufen angegeben und die Befunde haben sich teilweise von der jeweils vorhergehenden Untersuchung unterschieden. Zu diskutieren ist, ob mit der Zahl der Untersuchungen

(n=416) oder der Anzahl der Personen – wie hier vollzogen – gearbeitet hätte werden sollen. In der Regel weichen jedoch intraindividuelle Messwerte der einzelnen Sportler weit weniger voneinander ab, als es interindividuelle tun. Würden die Messwerte der mehrfach untersuchten Läufer mit ihren geringen Abweichungen jeweils vier oder fünf Mal mit in die Statistiken eingehen, so nähme die gesamte Auswertung eine Gewichtung zu deren Gunsten an (5, 100, 103, 114). Aus diesem Grund ging in diese Studie für jede Person jeweils nur ein Messwert ein, und zwar der jeweilige Mittelwert. Auf diese Weise soll der methodische Fehler der Gewichtung bei wiederholten Messungen vermieden werden (5, 100, 103, 114).

Die Einbeziehung des Energiestoffwechsels ist eine der großen Errungenschaften in der heutigen leistungsmedizinischen Diagnostik. Der Vorteil daraus wird sowohl in früheren Veröffentlichungen (54, 78, 86, 121) als auch in vorliegender Arbeit bestätigt und dadurch untermauert, dass die Ergebnisse von einer sehr guten Eignung der IAS für Vorhersageberechnungen zeugen. Fallstricke in der Bewertung der IAS konnten aber nicht ausgeschlossen werden. So ergeben ein vorausgegangenes Übertraining oder eine starke Belastung am Tag vor der Untersuchung zu geringe Blutlaktatkonzentrationen, was einen zu guten Trainingszustand vortäuschen kann (47). Auch Diät kann die Laktatleistungskurve beeinflussen (52).

Wie in Abbildung 4 zu sehen, erzielten Sportler mit überdurchschnittlicher IAS die besten Laufgeschwindigkeiten. Andersherum ausgedrückt findet sich keiner dieser Sportler im Bereich der schlechtesten Leistungen.

Eine Ausnahme des eindeutigen Zusammenhangs von IAS und Laufgeschwindigkeit findet sich wie erwartet nur bei der Distanz 1.500m. Vier Messwerte weichen deutlich von der Linie ab. Die guten Laufleistungen der vier Sportler, die diesen Punkten zugrunde liegen, bestätigen, dass die 1.500-m-Distanz auch mit anaerober Energiebereitstellung gelaufen werden kann und unterstützen die Hypothese, dass eine außerordentlich hohe IAS für den 1.500-m-Lauf keine Vorbedingung ist.

Manche Merkmale lassen sich nicht oder nur sehr schlecht messen. Zur Suche nach möglichen Ursachen für unterschiedliche (Lauf)-Leistungen darf aber nur der

Zusammenhang mit einem direkt untersuchten Merkmal in einer Aussage resultieren (100). Will man dennoch herausfinden, ob die nicht messbaren Merkmale einen Einfluss auf die Laufleistungen ausüben, muss man mit indirekten Messungen einen Kompromiss eingehen. Dies ließ sich auch in vorliegender Arbeit nicht immer vermeiden und geschah zum Teil bei der Einbeziehung von Schrittlänge und -frequenz in Kapitel 1.2.2. Die Körpergröße der Schrittlänge proportional zu setzen, kann nicht mehr als der Versuch einer Annäherung an die wirklichen Verhältnisse sein. Tatsächlich wird bei Weineck (142) davon ausgegangen, dass Körpergröße bzw. Hebelverhältnisse nicht für die Werte Schrittlänge und Schrittfrequenz gewertet werden können. Nichtsdestotrotz erschien es sinnvoll, die Körpergröße auf ihren Einfluss hin zu untersuchen. Obwohl die Körpergröße in der Regressionsanalyse mit berücksichtigt worden ist, sprechen die Einzelergebnisse der Korrelationsanalyse, in Annäherung an Ergebnisse aus anderen Studien (8, 9), nicht eindeutig dafür, dass hochgewachsene Läufer bessere Laufleistungen erbringen. Womit die Hypothese bestätigt wäre.

Mit den Ergebnissen der Altersabhängigkeit (Kapitel 3.3) können die Hypothesen aus Kapitel 1.2.2 in Übereinstimmung mit früheren Studien (35, 88, 136) größtenteils bestätigt werden. Bezüglich des 1.500m-Laufes entsprechen die Ergebnisse den Annahmen sehr genau. Für die Distanzen ab 5.000m kann die Frage nach Altersabhängigkeit allerdings im unteren Bereich nicht eindeutig beantwortet werden, da die Population zum weitaus überwiegenden Teil aus Läufern des Alters 25 Jahre und höher besteht. Ein Leistungsabfall nach der 2. Lebensdekade ist, wie vorbeschrieben, jedoch deutlich erkennbar (35, 136).

Anders beim Körpergewicht, das laut errechneter Gesamtergebnisse keinen Einfluss ausübt. Der Anteil des Körperfetts hingegen ist – wie auch von Bale et al. (8, 9) beschrieben – bei Spitzenläufern geringer. Dementsprechend beeinflusst er die Laufleistungen bereits bei isolierter Betrachtungsweise.

Die Kombination aus geringem Körperfettanteil, Alter um 25 Jahre und Körpergröße schließlich macht die Merkmale Alter und Anthropometrie zu vorhersagekräftigen Faktoren bei der Ermittlung nach Einflüssen auf die Laufleistung. Ein Vergleich mit der Literatur zeigt, dass nur das Lebensalter als mit am besten geeignetes Merkmal (35, 89,

132) vorbeschrieben war. Der BMI findet hier zwar teilweise bei den Einzelergebnissen, doch nicht in der Gesamtauswertung den vorbeschriebenen Stellenwert (16, 89).

Wie von anderen Autoren beschrieben, zeigten auch die in dieser Arbeit untersuchten Läufer vergrößerte Werte der Herzparameter, hervorgerufen durch Adaptationsvorgänge (18, 59). Wenngleich die Korrelationen nicht besonders vielversprechend schienen, so blieb doch das relative bzw. absolute Herzvolumen, und auf einzelnen Distanzen zusätzlich ESD, EDD, Größe des linken Vorhofes oder Aortenwurzel, signifikant in seiner Vorhersagekraft. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zur aufgestellten Hypothese und zu den Ergebnissen von Mickelson et al. (99). Die Herzfrequenz in Ruhe dagegen scheint nicht den vermuteten Einfluss zu besitzen (vorliegende Ergebnisse; 16).

Die Analyse des Einflusses von Herzgröße und -durchmessern büßt an Aussagekraft ein, weil die Messung eine indirekte ist. Zwar wurde diese Untersuchung für gewöhnlich von dem selben Arzt durchgeführt, so dass die interindividuelle Observervariabilität als relativ gering angesehen werden kann. Bei manchen Echokardiogrammen jedoch waren die Messwerte durch den Untersucher nicht vermerkt worden, so dass die Autorin diese nachträglich anhand der Ausdrücke ausmaß. Auf diese Weise ergibt sich eine weitere mögliche Variabilität. Zusätzlich wird die Reproduzierbarkeit der Bestimmung des (hier verwendeten) enddiastolischen Volumens als etwas schlechter angegeben als diejenige des Totalvolumens (26, 128, 139). Dickhuth et al. (32) geben die Reproduzierbarkeit (gesamte intra- und interindividuelle Observervariabilität) bei erfahrenen Untersuchern mit einem Variationskoeffizienten von 5% an. Vorteil der Echokardiographie gegenüber anderen Methoden ist es, dass sie nichtinvasiv und preisgünstig ist. Eine Verbesserung der Reliabilität und Validität steht uns möglicherweise in Zukunft durch dreidimensionale computerunterstützte Untersuchungstechniken zur Verfügung (30).

In vorliegender Arbeit lagen zur Auswertung der Herzparameter leider nicht für die gesamte untersuchte Population Echokardiogramme vor. Es ist daher fraglich, ob ein repräsentatives Spektrum von Läufern abgedeckt ist. Nach Überprüfung stellte sich heraus, dass auf sämtlichen Distanzen sowohl für die jeweils besten wie auch für die

schlechtesten Läufer Echokardiogramme vorlagen, so dass Extremwerte genauso wie die breite Mitte vertreten waren. Diese Tatsache relativiert die mangelnde Vollständigkeit und gibt der Aussage über den Einfluss des Herzens seine Berechtigung.

Da ein pathologisch verändertes Herz ähnliche Strukturen wie das Herz eines Athleten aufweisen kann, entsteht die Frage nach den Faktoren, die ein Herz zu der einen oder anderen Gruppe zählen lassen. So wurden bei den physiologisch hypertrophierten Herzen eines Sportlers vor allem fehlende Ischaemie, uneingeschränkte diastolische Funktion und Rückbildungsfähigkeit der Hypertrophie nach Trainingsaufgabe festgestellt (44, 50, 115, 141). Die kritische Grenze des physiologisch hypertrophierten, rückbildungsfähigen Herzens eines Athleten zur pathologischen Hypertrophie mit eingeschränkter Funktion und Myokardschaden ist allerdings nicht bekannt (109). Pelliccia et al. ermittelten, dass die Wanddicke des linken Ventrikels eines Athleten selten mehr als 13mm beträgt und – anders als beim pathologischen Herzen - 16mm praktisch nicht übersteigt (110). Laut Dickhuth et al. ist ein absoluter kritischer Grenzwert der physiologischen Hypertrophie nicht ableitbar (27). Vielmehr wurde eine physiologische Größenzunahme in Relation zum Körpergewicht beschrieben und festgestellt, dass diese 70% des Ausgangswertes üblicherweise nicht übersteigt (27, 30).

Wie die Ausbildung eines „Sportlerherzens“ wird auch die Verbesserung der Lungenfunktionswerte mit an erster Stelle aufgeführt, wenn Adaptationsvorgänge des Körpers durch Ausdauersport beschrieben werden. Die Vitalkapazität stellt eine der ältesten Größen der Lungenfunktionsdiagnostik dar (58). Dabei wird beschrieben, dass die Ventilation unter normalen Umständen nicht leistungsbegrenzend sei (6, 69). Tatsächlich zählen Marathonläufer zu der Gruppe von Sportlern, welche die niedrigsten Vitalkapazitäten aufweisen (53).

Dem gegenüberstehend zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass sich bestimmte Lungenfunktionswerte für eine Vorhersage der Laufgeschwindigkeiten eignen. Für die kürzeste der untersuchten Distanzen zeigt sich die Einsekundenkapazität – anders als durch die Ergebnisse der Korrelationsanalyse angenommen – signifikant in ihrer Vorhersagefähigkeit von Laufleistungen. Gleichzeitig ist sie der einzige Lungenfunktionswert, bei dem die Linien der Vertrauensintervalle in der

Regressionsanalyse die Mittellinie kreuzen. D.h. die Sekundenkapazität beweist nicht erst in der Kombination mit weiteren Merkmalen – wie das anderweitig vorkommt – ihre Signifikanz. Dies scheint auch wenig übereinstimmend mit Aussagen weiterer Autoren über Trainierbarkeit oder Bedeutung der Einsekundenkapazität (1, 24, 25, 34, 49, 75, 84, 131).

Dass die Ventilation nicht leistungsbegrenzend sein soll, scheint damit nur für den Langstreckenbereich zu gelten. Beim 1.500-m-Lauf spielt das Vermögen, schnell große Volumina ein- und ausatmen zu können, durchaus eine Rolle. Zwar wurde in dieser Studie nicht auf noch kürzere Strecken hin untersucht, doch scheint es logische Konsequenz, dass auch dort eine Verbesserung der Sekundenkapazität in einer besseren Laufleistung resultieren würde.

Auffällig bei den Korrelationen von Lungenfunktion und Laufleistungen ist, dass sämtliche Korrelationen mit zunehmender Distanz abnehmen. Die Abhängigkeit der Laufgeschwindigkeit von den Lungenkapazitäten ist demnach auf längeren Distanzen nicht so stark ausgeprägt wie auf kürzeren. Für die beiden Distanzen 5.000m und 10.000m zeigt die forcierte Einsekundenkapazität einen höheren Zusammenhang zur Laufgeschwindigkeit als die Vitalkapazität. Erst bei Halbmarathon und Marathon kehrt sich wie erwartet das Verhältnis um. Dass die in Kapitel 1.2.4 aufgestellte Hypothese über eine mangelnde Vorhersagbarkeit von Laufleistungen aus den Lungenfunktionswerten revidiert werden muss, wird durch die Regressionsanalyse weiter verdeutlicht. Es wird ebenfalls deutlich, dass – im Gegensatz zur Hypothese – Laufleistungen nicht nur für ältere Läufer vorhersagbar waren (vgl. (76).

Auch die Hypothese über erhöhte Vitalkapazitäten bei Spitzenläufern ließ sich so nicht bestätigen.

Für die Auswirkungen einer verkürzten ischiocruralen Muskulatur ergaben sich besonders überraschende Ergebnisse. Daraus Empfehlungen zugunsten verkürzter ischiocruraler Muskulatur ableiten zu wollen, ist selbstverständlich nicht zulässig. Man ist leicht versucht, zumindest beim Halbmarathon den Schluss zu ziehen, eine verkürzte ischiocrurale Muskulatur bringe generell bessere Laufleistungen. Ob die Differenzen relevant sind, darüber klären die Ergebnisse des t-Testes in Tabelle 5 auf. Für die Distanzen 1.500m und Marathon zeigen sich nicht signifikante Unterschiede. Selbst für

den 5.000-m-Lauf ist der Unterschied nur nahe der Signifikanz. Obwohl die absolute Differenz beim Halbmarathon die größte im Vergleich zu den anderen Distanzen ist, liegt auch hier kein signifikantes Ergebnis vor. Nur der 10.000-m-Lauf, für den gleichzeitig die meisten Bestzeiten vorliegen, kommt einem signifikanten Ergebnis sehr nahe.

Durch diese isolierte Betrachtung der Muskulatur und vor allem für die Distanzen mit geringem Unterschied ist allerdings nicht ersichtlich, ob die Verkürzung der Grund für die besseren Laufleistungen ist. Eine Aussage über Kausalität ist auch nicht die Absicht dieser retrospektiven Studie. Denn nur bei aktiv veränderten Eigenschaften im Rahmen experimenteller Studien, die vorwiegend prospektiv sind, dürfen Rückschlüsse auf kausale Zusammenhänge gezogen werden (137).

Dennoch ist aus der Beobachtung klar ersichtlich, dass Läufer mit verkürzter ischiocruraler Muskulatur nicht langsamer laufen als jene ohne. Eine Verkürzung kann demnach kaum Grund für schlechte Laufleistungen sein.

Weiteres Untersuchungspotential steckt in der Überlegung, ob sich die Läufer mit verkürzter ischiocruraler Muskulatur häufiger verletzen als jene ohne Verkürzung.

Auch die Ergebnisse über sogar bessere Laufleistungen bei Läufern mit Haltungsschwäche der Wirbelsäule erstaunen. Vermutlich darf dem jedoch weniger Bedeutung beigemessen werden als den Ergebnissen der ischiocruralen Verkürzung. Die Berechnungen im 1.500-m-Bereich, in dem lediglich bei fünf Personen ein Hohlkreuz bzw. bei 16 Personen ein Rundrücken diagnostiziert wurde, sind aufgrund des geringen Stichprobenumfangs als eingeschränkt aussagefähig anzusehen. Zusätzlich weisen die Läufer mit Haltungsschwäche – wie in Tabelle 8 dargestellt – neben den besseren Laufgeschwindigkeiten durchweg weitere in dieser Arbeit als günstig postulierte Eigenschaften auf: größere Herzvolumina, geringeres Alter, größere Lungenvolumina, geringeres Körpergewicht, höhere IAS.

Die Untersuchung des Flachrückens betreffend können die Beobachtungen der Distanzen 1.500m, 5.000m und Halbmarathon nicht für statistische Zwecke verwendet werden, denn hier besitzen lediglich eine bzw. zwei Personen einen Flachrücken gegenüber der Vergleichsgruppe von 53 bis 104 Personen. Auch für die Strecken

10.000m und Marathon sind die Beobachtungen grenzwertig. (10.000m: acht Personen mit, 207 ohne Flachrücken und Marathon: 9 Personen mit, 145 ohne Flachrücken.)

Die gewonnenen Erkenntnisse geben nun Anlass, die in Kapitel 1.2.5 aufgestellte Hypothese zu korrigieren. Für Hohlkreuz und Rundrücken waren jeweils die Laufleistungen bei positivem Rückenbefund besser. Für den Flachrücken waren sie schlechter. In der Mehrzahl der Fälle ergaben sich jedoch nicht signifikante Beobachtungen. Einzig für den 10.000-m-Lauf zeigte sich, dass der Unterschied zwischen Läufern mit und jenen ohne Rundrücken signifikant ist. Für diesen Fall darf somit die Hypothese eindeutig widerlegt werden. Was die übrigen Beobachtungen angeht, so kann ausgesagt werden, dass es zumindest nicht von Nachteil ist, einen Rundrücken oder ein Hohlkreuz zu haben.

Bezüglich Fußform wäre interessant zu wissen, ob ein physiologisch geformter Fuß mit seinem suffizienten Halteapparat und elastisch erhaltener Gewölbekonstruktion höhere Belastungsintensitäten auszuhalten vermag als es ein deformierter Fuß kann (92, 107). Die Ergebnisse dieser Studie sprechen dagegen, denn es ergaben sich sehr eindeutige Beobachtungen: Schnelle und langsame Läufer weisen gleichermaßen Deformitäten ihrer Füße auf (vgl. (70)).

Eine Ausnahme liefern die Ergebnisse der Senkfüße auf der Distanz 1.500m: Auf dieser Distanz fanden sich 29 Personen ohne und 25 mit Senkfüßen. Tendenziell schnitten Läufer ohne Senkfüßen besser ab. Der Vergleich der Mittelwerte anderer Merkmale deckt in den meisten Fällen günstigere – im Sinne der durch diese Studie als günstiger errechnete – Werte der Sportler ohne Senkfüße auf. Beispiele sind Herzvolumen ( $920,56 \pm 147,64$  ml gegenüber  $834,45 \pm 204,15$  ml), Einsekundenkapazität ( $4,46 \pm 0,72$  Liter gegenüber  $4,33 \pm 0,77$  Liter), Körperfett ( $7,40 \pm 2,17\%$  gegenüber  $9,32 \pm 4,60\%$ ) oder IAS ( $4,54 \pm 0,48$  gegenüber  $4,26 \pm 0,51$  m/s). Zuerst angegeben ist jeweils die Gruppe ohne Senkfüße. Die Differenzen sind nicht signifikant. Wie auch schon beim Vergleich der Wirbelsäulenform mit den Leistungen auf 10.000m lässt sich die tendenziell bessere Laufleistung der Sportler ohne Senkfüße vermutlich darauf

zurückführen, dass sich die übrigen einflussnehmenden Faktoren ebenfalls zugunsten dieser Gruppe auswirken.

Die Hypothese c) aus Kapitel 1.2.5 lies sich bestätigen. Tabelle 1 zeigt zusätzlich die Häufigkeit des Vorkommens v.a. von Spreizfüßen. Hypothese d) desselben Kapitels jedoch kann nicht bestätigt werden, da sich auch unter den besten Läufern Fußdeformitäten fanden.

Im Kapitel Orthopädie erscheinen Interobserver Variabilität und mangelnde Objektivität am ausgeprägtesten zu sein. Mehrmaliges Vorstellen in der sportmedizinischen Poliklinik und Untersuchung durch verschiedene Ärzte ergaben nicht selten Differenzen in der Befunderhebung der Wirbelsäulenhaltung. Unklar ist, ob sich eine Haltungsschwäche in der Zwischenzeit aus- bzw. zurückgebildet hat, oder ob die verschiedenen Ärzten unterschiedliche „Toleranzschwellen“ bezüglich der Diagnose einer Haltungsschwäche haben.

Noch ausgeprägter fielen Diskrepanzen dieser Art für die Diagnose des Spreizfußes auf. Da der Spreizfuß bei unzureichendem Schuhwerk, Übergewicht und in bestimmten Berufszweigen überaus häufig vorkommt (106), ist der erhobene Befund eines Spreizfußes bei mehr als zwei Dritteln der untersuchten Personen jedoch durchaus als realistisch einzustufen.

Die Untersuchung der Trainingsdaten ergab – im Gegensatz zu Ergebnissen anderer Autoren (8, 9, 19, 89) – die erstaunliche Erkenntnis, dass es von geringer Relevanz ist, wie lange ein Läufer bereits trainiert. Zwar war bereits bekannt, dass die Häufigkeit des Trainings einen größeren Einfluss auf die körperliche Leistungsfähigkeit hat als das Trainingsalter (130). Doch laut der hier berechneten Ergebnisse scheint es, als ob Adaptationsvorgänge des Körpers, welche sich über Monate und Jahre entwickeln müssen, einen extrem geringen, um nicht zu sagen keinen Einfluss ausüben. Allerdings kann dem Trainingsalter eine eventuell doch vorhandene Bedeutung nicht gänzlich abgesprochen werden, da keine der untersuchten Personen seit weniger als einem Jahr trainiert. Innerhalb eines Jahres wird sich zwar kein „Sportlerherz“ ausbilden, doch können erste Anpassungserscheinungen durchaus beobachtet werden (3, 55, 97, 116,

125, 126, 133, 144). Erst für höhere Trainingsalter bestätigt also die Analyse den fehlenden Einfluss auf Laufleistungen.

Israel (60) erwägt, dass die endgültige Ausprägung der biologischen Grundlagen für Schnelligkeit sehr frühzeitig erfolgt. Das würde bedeuten, dass nur wer in sehr jungen Jahren zu trainieren beginnt, eine echte Chance hat, die körperliche Basis für gute Leistungen zu entwickeln. Das Durchschnittsalter der Probanden aber beträgt  $33,0 \pm 10,30$  Jahre, zu trainieren begonnen haben sie im Schnitt mit  $26,77 \pm 9,58$  Jahren. Nur vier der 320 untersuchten Personen haben im Alter von 10 Jahren oder jünger ein Ausdauertraining angefangen. 49 Personen waren 16 Jahre alt oder jünger. Es stellt sich die Frage, was Israel mit „so früh wie möglich“ meint und ob dies tatsächlich von Bedeutung ist. Betrachtet man für jede Distanz jeweils die drei besten Läufer, d.h. die insgesamt 15 besten Laufgeschwindigkeiten, so geht daraus kein ersichtlicher Zusammenhang von Trainingsbeginn und den herausragenden Leistungen hervor: zwar findet sich darunter vier Mal das Alter von 15 und einmal das von 13 Jahren als Trainingsbeginn, doch wurden die übrigen zehn Bestleistungen von Sportlern erbracht, die sich bei Aufnahme eines Trainings bereits im Erwachsenenalter befanden. Auffallend ist, dass die betreffenden Läufer ein Trainingspensum von wenigstens 80, zum Großteil jedoch 120 bis zu 200 Laufkilometern pro Woche bewältigen.

Bleibt bezüglich der Trainingsdaten der Blick auf den Zusammenhang von Wochenkilometern und Laufleistung. Hierbei fällt auf, dass besonders die über  $r = 0,7$  liegenden Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 9) der Distanzen von 10.000m und darüber im Vergleich zu allen anderen in diese Studie aufgenommenen Messwerte außerordentlich hoch sind (übereinstimmend mit Ergebnissen anderer Studien, (9, 13, 16, 48, 89, 94, 125). Lediglich die Individuelle Anaerobe Schwelle brachte eine höhere Korrelation.

Bestätigt ist dadurch die Hypothese aus Kapitel 1.2.6 betreffend der Wochenkilometerzahl. In Bezug auf das Trainingsalter stellte sie sich als falsch heraus.

So scheint der Körper den ständigen Reiz der Beanspruchung zu benötigen, um im Wettkampf vergleichbar herausragende Leistungen bringen zu können (vorliegende Ergebnisse, 3, 77, 80, 81, 93). Einerseits vermittelt diese Tatsache die angenehme Gewissheit, dass durch hohen Trainingsaufwand die Belohnung einer guten Laufleistung erwartet werden kann. Andererseits führt sie deutlich vor Augen, dass man, hat man seinen Körper einmal fit trainiert und gute Leistungen erzielt, sich nicht auf seinen Lorbeeren ausruhen darf. Vielmehr ist ständiges Training erforderlich.

In der regressionsanalytischen Gesamtauswertung ergaben sich, mit leichter Abweichung der Distanz 1.500m, sehr exakte Vorhersageberechnungen. Das Lebensalter gehörte entgegen anderer Berichte (35, 89, 132) nicht immer zu den geeignetsten Merkmalen für die Vorhersage von Laufleistungen. Die Wochenkilometer hingegen gehörten wie vorbeschrieben (8, 16, 89) für die Distanzen 10.000m und Marathon dazu, wobei dies für das Trainingsalter nur beim Marathon und nicht bei 10.000m der Fall war (8, 9, 89).

Insgesamt konnte die zuvor bereits klare Vorhersagekraft der IAS durch die in dieser Regressionsanalyse ermittelten Messwerte zusätzlich gesteigert werden.

Wie in Kapitel 3 ersichtlich, konnte es vorkommen, dass sich das gesamte Vorhersagemodell als signifikant erwies, obwohl einzelne Merkmale keinen signifikanten Einfluss besitzen. Anhand eines solchen Falles wird deutlich, dass eine Vorhersage zuweilen nur unter Berücksichtigung mehrerer Merkmale möglich ist.

Die Berücksichtigung mehrerer potenzieller Einflüsse hilft auch, bei überraschenden Ergebnissen, keine voreiligen Schlüsse zu ziehen. Dies wurde in der vorliegenden Arbeit immer wieder beachtet und zeichnet sie als adäquate Methode für multifaktorielle Vorhersagerechnungen aus. Wo einzelne Messwerte nicht in das Bild der gewonnenen Erkenntnisse passten, wurde versucht, der Ursache dafür auf den Grund zu gehen – auch wenn das nicht immer gelang.

Nichtsdestotrotz ließ sich eine Richtung der einflussnehmenden Faktoren herauskristallisieren. Dies gibt Anlass, die angewandte Methodik auch für andere

multifaktoriell bedingte Bereiche sowohl pathologischer als auch physiologischer Art zu empfehlen. Andere Sportarten wie Hürdenlauf, Schwimmen, Skispringen, Radrennfahren und viele mehr kommen dafür in Frage. Auch eine vergleichende Analyse mehrerer Sportdisziplinen wäre denkbar.

Im krankheitsspezifischen Bereich könnten zum Beispiel die Einflüsse auf einen Bluthochdruck analysiert werden. Anzahl gerauchter Zigaretten, Körpergewicht, Alter, Berufszweig (stehende oder sitzende Tätigkeit, viel oder wenig Verantwortung im Sinne eines Stressindikators), wöchentliche Dauer sportlicher Betätigung usw. könnten mit einbezogen werden.

Beim Diabetes mellitus, vor allem beim Typ I Diabetes, eignet sich das Alter der Krankheitsmanifestation für eine Analyse. Der Typ-1-Diabetes manifestiert sich zunehmend in höherem Lebensalter (65). Familiäre Belastung, anthropometrische Daten, Höhe der Autoantikörper, Blutfettwerte, Blutdruck und Harnsäurestatus im Blut etc. kommen als zu untersuchende Faktoren in Betracht.

Ein Beispiel aus der Gynäkologie wäre die Analyse ungewollter Schwangerschaftsabbrüche. Hier können neben den üblichen genetischen und körperlich – gesundheitlichen Faktoren auch Umwelteinflüsse wie die Nähe zu einer Mobilfunkantenne oder Stress durch unnatürlichen Lärm, zum Beispiel Straßenverkehrslärm, untersucht werden.

Die Liste der Beispiele ließe sich auf alle denkbaren Bereiche ausweiten.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN:

1. Laufleistungen lassen sich unter Einbeziehung der benutzten Messwerte sehr gut vorhersagen;
2. Die einzelnen Faktoren besitzen je nach Distanz einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Laufleistung;
3. Die angewandte Methode eignet sich auch für multifaktorielle Vorhersagerechnungen in anderen Bereichen.

## 5 Zusammenfassung

Leistungen des Menschen sowie die Pathogenese von Krankheiten werden in der überwiegenden Zahl multifaktoriell bestimmt. Die vielseitigen Einflüsse auf die Laufleistung gelten als größtenteils bekannt. In dem Versuch, modellhaft gängige Lehrmeinungen zu bestärken oder anzufechten, wurden die Akten von 320 Laufsportlern aus dem Freizeit- bis Hochleistungsbereich ausgewertet. Für jede Person lagen die persönlichen Bestzeiten auf einer oder mehrerer der Distanzen 1.500m, 5.000m, 10.000m, Halbmarathon und Marathon vor. Es wurden Messwerte von anthropometrischen Merkmalen, Herz, Lunge und IAS sowie orthopädische Befunde und Trainingsdaten genauer betrachtet.

Die Auswertung erfolgte unter Zuhilfenahme der statistischen Methoden Häufigkeitsverteilung, Gruppierung, Korrelation, t-Test und multiple schrittweise Regression sowie multiple lineare Regression.

Wie erwartet zeigte sich ein eindeutiger positiver Zusammenhang von IAS und Laufleistung. Ebenso ergab sich für diejenigen Läufer mit den besseren Laufleistungen, dass ihre Laktatkonzentration im Blut an der Laktatschwelle tendenziell niedriger war als bei den schlechteren Läufern.

Die Ergebnisse von Alter und Anthropometrie ergaben für fast alle Distanzen einen Beginn des Leistungsabfalls vor Erreichen des 30. Lebensjahres. Für den 1.500-m-Lauf war ein Leistungsabfall ab dem Alter von 25 Jahren zu beobachten. Die Körpergröße zeigte nur für die Distanzen 5.000m und 10.000m einen Zusammenhang. Der Anteil des Körperfettes war auf allen Distanzen signifikant, während Körpergewicht und Body-Mass-Index dies nicht waren.

Die Messwerte des Herzens und der Lunge scheinen in ihrer Bedeutung überschätzt zu werden. Die Ergebnisse des Herzens zeigten mehr Einfluss als die der Lunge, doch waren die Korrelationskoeffizienten niedrig. Die forcierte Einsekundenkapazität der

Lunge schien auf kürzeren Strecken einen stärkeren Einfluss zu haben als die Vitalkapazität. Insgesamt waren die Lungenfunktionswerte auf kürzeren Distanzen relevanter als auf längeren.

Für die orthopädischen Daten ergab sich die erstaunliche Erkenntnis, dass weder eine verkürzte ischiocrurale Muskulatur, noch Rundrücken oder Hohlkreuz einen negativen Einfluss auf Laufgeschwindigkeiten ausüben. Auch bei vorhandenen Fußdeformitäten konnten keine schlechteren Leistungen festgestellt werden.

Bei den Trainingsdaten wurde zwar ein Einfluss des Trainingsalters nicht abgelehnt, angesichts des engen positiven Zusammenhangs zwischen Laufleistung und wöchentlichem Trainingsumfang erscheint dieser jedoch vernichtend gering.

In der regressionsanalytischen Gesamtauswertung aller verfügbaren Messwerte zeigte sich, dass die gute Vorhersagefähigkeit der IAS durch die weiteren Messwerte gesteigert werden konnte. Es wurde deutlich, welche weiteren Faktoren distanzspezifisch von Bedeutung sind.

Die in dieser Arbeit angewandte Vorgehensweise diente zum einen der Untersuchung der Einflüsse auf Laufleistungen. Zum anderen stellt sie sich als Modell für die Analyse weiterer Größen, welche ebenfalls unter multifaktoriellem Einfluss stehen, dar.

## 6 Literaturverzeichnis

1. **Aarseth, H.P.** (1982)  
The effect of regular physical activity on the organs of ventilation. Scand.J.Soc.Med.Suppl 2951-53.
2. **Abe, D., Sakaguchi, Y., Tsuchimochi, H., Endo, M., Miyake, K., Miyahiro, S., Kanamaru, K., Niihata, S.** (1999)  
Assessment of long-distance running performance in elite male runners using onset of blood lactate accumulation. Appl.Human Sci. 18(2):25-29.
3. **Acevedo, E.O., Goldfarb, A.H.** (1989)  
Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. Med.Sci.Sports Exerc. 21(5):563-568.
4. **American Thoracic Society.** (1994)  
Standardization of Spirometry. Am.J.Respir.Crit.Care Med. 1521107-1136.
5. **Andersen, B.** (1990)  
Methodological errors in medical research. Blackwell, Oxford .
6. **Badtke, K.** (1999)  
Lehrbuch der Sportmedizin. UTB Wissenschaft, 4.Aufl.
7. **Baldari, C., Guidetti, L.** (2000)  
A simple method for individual anaerobic threshold as predictor of max lactate steady state. Med.Sci.Sports Exerc. 32(10):1798-1802.
8. **Bale, P., Bradbury, D., Colley, E.** (1986)  
Anthropometric and training variables related to 10km running performance. Br.J.Sports Med. 20(4):170-173.
9. **Bale, P., Rowell, S., Colley, E.** (1985)  
Anthropometric and training characteristics of female marathon runners as determinants of distance running performance. J.Sports Sci. 3(2):115-126.
10. **Baller, K.B.** (1999)  
Standards in der Sportmedizin: Die Untersuchung der Wirbelsäule in der Sportmedizin, Teil 1. Dt.Z.Sportmed. Jahrgang 50(10)321-322.

11. **Ballreich, R.** (1969)  
Weg- und Zeit-Merkmale von Sprintbewegungen. Bartels und Wernitz, Berlin, München, Frankfurt .
12. **Bernhard, W., Jung, K.** (1998)  
Sportanthropologie: Fragestellungen, Methoden und Ergebnisse am Beispiel der Laufdisziplinen und des alpinen Skirennsports. Gustav Fischer Verlag 36-52. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm
13. **Billat, V.L., Demarle, A., Slawinski, J., Paiva, M., Koralsztein, J.P.** (2001)  
Physical and training characteristics of top-class marathon runners. Med.Sci.Sports Exerc. 33(12):2089-2097.
14. **Bland, M.** (1995)  
An Introduction to Medical Statistics. 2nd Edition, Oxford Medical Publications, Oxford, New York .
15. **Boos, N., Kissling, R.** (1999)  
Diagnostische Abklärung beim lumbalen Rückenschmerz. Praxis 88308.
16. **Campbell, M.J.** (1985)  
Predicting running speed from a simple questionnaire. Br.J.Sports Med. 19(3):142-144.
17. **Cavanagh, P.R., Kram, R.** (1989)  
Stride length in distance running: velocity, body deminsions, and added mass effects. Med.Sci.Sports Exerc. Aug;21(4)467-479.
18. **Child, J.S., Barnard, R.J., Taw, R.L.** (1984)  
Cardiac hypertrophy and function in master endurance runners and sprinters. J.Appl.Physiol Jul;57(1)175-181.
19. **Christensen, C.L., Ruhling, R.O.** (1983)  
Physical characteristics of novice and experienced women marathon runners. Br.J.Sports Med. 17(3):166-171.
20. **Coen, B., Schwarz, L., Urhausen, A., Kindermann, W.** (1991)  
Control of training in middle- and long-distance running by means of the individual anaerobic threshold. Int.J.Sports Med. 12(6):519-524.
21. **Coen, B., Urhausen, A., Kindermann, W.** (2001)  
Individual anaerobic threshold: methodological aspects of its assessment in running. Int.J.Sports Med. 22(1):8-16.

22. **Cohen, J.L., Segal, K.R.** (1985)  
Left ventricular hypertrophy in athletes: an exercise-echocardiographic study. *Med.Sci.Sports Exerc.* Dec;17(6):695-700.
23. **Crasselt, W.** (1970)  
Anthropometrische Werte im Entwicklungsverlauf während der Wachstumsperiode. *Theorie und Praxis der KK* 6540-545.
24. **Danuser, H.J., Buhlmann, A.A.** (2-4-1983)  
Effect of regular training on total and vital capacity of the lung in 17 to 25-year-old rowers. *Schweiz.Med.Wochenschr.* 113(13):454-458.
25. **Davies, B., Daggett, A.** (1977)  
Responses of adult women to programmed exercise. In: *Sports and breathing.* *Br.J.Sports Med.* 11(3)122-126.
26. **Dickhuth, H.H.** (1983)  
Ein- und zweidimensionale Echokardiographie zur Beurteilung der physiologischen und pathologischen Herzhypertrophie. Freiburg: Universität, Habilitationsschrift .
27. **Dickhuth, H.H., Abel, R., Wink, K., Bonzel, T., Keul, J., Just, H.** (1984)  
Physiologische und pathologische Linksherzhypertrophie. Kritisches Herzgewicht - eine Fiktion? *Z.Kardiol.* 73 Supp 184.
28. **Dickhuth, H.H., Huonker, M., Münzel, T., Drexler, H., Berg, A., Keul, J.** (1991)  
Individual anaerobic threshold for evaluation of competitive athletes and patients with left ventricular dysfunctions. In: *Bachl, N., Graham, T.E., Löllgen, H.* (Hrsg.): *Advances in Ergometry.* Springer-Verlag, Berlin.
29. **Dickhuth, H.H., Lehmann, M., Abel, R., Keul, J.** (1983)  
Two-dimensional stress echocardiography and plasma catecholamine measurements in the evaluation of the physiologically hypertrophied heart. *Z.Kardiol.* 72(5):268-276.
30. **Dickhuth, H.H., Röcker, K., Niess, A., Hipp, A., Heitkamp, H.C.** (1996)  
The echocardiographic determination of volume and muscle mass of the heart. *Int.J.Sports Med.* Nov;17 Suppl 3132-139.
31. **Dickhuth, H.H., Simon, G., Kindermann, W., Wildberg, A., Keul, J.** (1979)  
Echocardiographic studies on athletes of various sport-types and non-athletic persons (author's transl). *Z.Kardiol.* 68(7):449-453.

32. **Dickhuth, H.H., Urhausen, A., Huonker, M., Heitkamp, H.C., Kindermann, W., Simon, G., Keul, J. (1990)**  
Die echokardiographische Herzgrößenbestimmung in der Sportmedizin. Dt.Z.Sportmed. 41(1)4-12.
33. **Dickhuth, H.H., Yin, L., Niess, A., Rucker, K., Mayer, F., Heitkamp, H.C., Horstmann, T. (1999)**  
Ventilatory, lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: relationship and reproducibility. Int.J.Sports Med. 20(2):122-127.
34. **Elovainio, R., Sundberg, S. (1983)**  
A five-year follow-up study on cardiorespiratory function in adolescent elite endurance runners. Acta Paediatr.Scand. 72(3):351-356.
35. **Evans, S.L., Davy, K.P., Stevenson, E.T., Seals, D.R. (1995)**  
Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. J.Appl.Physiol 78(5):1931-1941.
36. **Fagard, R., Aubert, A., Lysens, R., Staessen, J., Vanhees, L., Masery, A. (1983)**  
Noninvasive assessment of seasonal variations in cardiac structure and functions in cyclists. Circulation 67:896-901.
37. **Fagard, R., Aubert, A., Staessen, J., Eynde, E.V., Vanhees, L., Amery, A. (1984)**  
Cardiac structure and function in cyclists and runners. Comparative echocardiographic study. Br.Heart J. Aug;52(2):124-129.
38. **Fagard, R.H. (1992)**  
Impact of different sports and training on cardiac structure and function. Cardiol.Clin. May;10(2):241-256. Review.
39. **Fagard, R.H. (1997)**  
Impact of different sports and training on cardiac structure and function. Cardiol.Clin. Aug;15(3)397-412. Review.
40. **Fisher, A.G., Adams, T.D., Yanowitz, F.G., Ridges, J.D., Orsmond, G., Nelson, A.G. (1-2-1989)**  
Noninvasive evaluation of world class athletes engaged in different modes of training. Am.J.Cardiol. 63(5):337-341.
41. **Friel, J. (1999)**  
Training with Power. Tune Cooperation . USA

42. **Garfinkel, D., Rothenberger, L.A.** (1984)  
Foot problems in athletes. *J.Fam.Pract.* 19(2):239-250.
43. **Gerhart, G., Karsten, H.** (1987)  
Physik Fachoberschule, Formeln und Tabellen. Handwerk und Technik, 4.Aufl., Hamburg .
44. **Granger, C.B., Karimedдини, M.K., Smith, V.E., Shapiro, H.R., Katz, A.M., Riba, A.L.** (1985)  
Rapid ventricular filling in left ventricular hypertrophy: I. Physiologic hypertrophy. *J.Am.Coll.Cardiol.* Apr;5(4)862-868.
45. **Groh, H.** (1971)  
Wirbelsäulenschäden beim Leistungssport. *Sportarzt und Sportmed.* 10/11221-270.
46. **Haber, P., Honiger, B., Klicpera, M., Niederberger, M.** (1984)  
Effects in elderly people 67-76 years of age of three-month endurance training on a bicycle ergometer. *Eur.Heart J.* 5 Suppl E37-39.
47. **Häckel, A.** (2000)  
Routine-Check in Frankfurt. *Ärzte Zeitung* 19.01.2000. Neu-Isenburg
48. **Hagan, R.D., Upton, S.J., Duncan, J.J., Gettman, L.R.** (1987)  
Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices in female distance runners. *Br.J.Sports Med.* 21(1):3-7.
49. **Hagberg, J.M., Yerg, J.E., Seals, D.R.** (1988)  
Pulmonary function in young and older athletes and untrained men. *J.Appl.Physiol* 65(1):101-105.
50. **Hauser, A.M., Dressendorfer, R.H., Vos, M., Hashimoto, T., Gordon, S., Timmis, G.C.** (1985)  
Symmetric cardiac enlargement in highly trained endurance athletes: a two-dimensional echocardiographic study. *Am.Heart J.* May;109(5Pt1)1038-1044.
51. **Held, T., Marti, B.** (1999)  
Substantial influence of level of endurance capacity on the association of perceived exertion with blood lactate accumulation. *Int.J.Sports Med.* 20(1):34-39.

52. **Hofmann, P., Lamprecht, M., Schwabinger, G., Pokan, R., von Duvillard, S.P. (1998)**  
Einfluss unterschiedlicher Diätformen auf die Laktatleistungskurve im Stufentest und das Laktatverhalten bei Dauerbelastung auf dem Fahrradergometer - eine Einzelfallstudie. Dt.Z.Sportmed. 49(3):82-87.
53. **Hollmann, W., Hettinger, Th. (1990)**  
Sportmedizin, Arbeits- und Trainingsgrundlagen. Schattauer, 3.Aufl., Stuttgart, New York .
54. **Höltke, V., Steuer, M., Jakob, E. (2000)**  
Zur Prognose der Wettkampfleistung bei älteren Marathonläufern aufgrund eines spiroergometrischen Laufbandstufentests. Krankenhaus für Sportverletzte Hellersen .
55. **Houmard, J.A. (1991)**  
Impact of reduced training on performance in endurance athletes. Sports Med. 12(6):380-393.
56. **Houmard, J.A., Costill, D.L., Mitchell, J.B., Park, S.H., Hickner, R.C., Roemmich, J.N. (1990)**  
Reduced training maintains performance in distance runners. Int.J.Sports Med. 11(1):46-52.
57. **Houmard, J.A., Scott, B.K., Justice, C.L., Chenier, T.C. (1994)**  
The effects of taper on performance in distance runners. Med.Sci.Sports Exerc. 26(5):624-631.
58. **Hutchinson, J. (1846)**  
On capacity of lungs and on respiratory functions view of establishing precise and easy method of detecting disease by spirometer. Trans.Med.-Chir.Soc.Edinb. 29137.
59. **Ikaheimo, M.J., Palatsi, I.J., Takkunen, J.T. (1979)**  
Noninvasive evaluation of the athletic heart: sprinters versus endurance runners. Am.J.Cardiol. Jul;44(1):24-30.
60. **Israel, S. (1977)**  
Bewegungskoordination frühzeitig ausbilden. Lehre der Leichtathletik 30989.

61. **Jakob, E., Keul, J. (1994)**  
Die anaerobe Schwelle ermittelt aus Herzfrequenz- und Laktatleistungskurve und ihre Anwendung im Nordischen Skisport. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning D. (Hrsg): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik.211-218. Stuttgart, Jena, New York
62. **JMP. (1995)**  
Introductory Guide, Version 3 of JMP. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA .
63. **Johnson, R. (1983)**  
Common running injuries of the leg and foot. Minn.Med. 66(7):441-444.
64. **Jonath, U. (1988)**  
Lexikon Trainingslehre. Rowohlt Sport, Reinbek bei Hamburg .
65. **Kanz, L. (2000)**  
Diabetes mellitus. Vorlesungsmitschriften, Tübingen .
66. **Keith, S.P., Jacobs, I., McLellan, T.M. (1992)**  
Adaptations to training at the individual anaerobic threshold. Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol 65(4):316-323.
67. **Kenney, W.L., Hodgson, J.L. (1985)**  
Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. Br.J.Sports Med. Dec,19((4)):207-209.
68. **Keul, J., Dickhuth, H.H., Simon, G., Lehmann, M. (1981)**  
Effect of static and dynamic exercise on heart volume, contractility, and left ventricular dimensions. Circ.Res. 48(6 Pt 2):1162-1170.
69. **Keul, J., Kindermann, W., Simon, G. (1978)**  
Die aerobe und die anaerobe Kapazität als Grundlage für die Leistungsdiagnostik. Leistungssport 123.
70. **Klinge, J., Hoppeler, H., Biedert, R. (1993)**  
Statistical deviations in high-performance athletes. Schweiz.Z.Sportmed. 41(2):55-62.
71. **Klinke, R., Silbernagl, S. (1996)**  
Lehrbuch der Physiologie. Georg Thieme Verlag, 2.Aufl., Stuttgart, New York .

72. **Kubukeli, Z.N., Noakes, T.D., Dennis, S.C.** (2002)  
Training techniques to improve endurance exercise performances. *Sports Med.* 32(8):489-509.
73. **Kuipers, H., Janssen, G.M., Bosman, F., Frederik, P.M., Geurten, P.** (1989)  
Structural and ultrastructural changes in skeletal muscle associated with long-distance training and running. *Int.J.Sports Med.* Oct;10Suppl3:156-159.
74. **Laerum, M., Laerum, O.D.** (1982)  
Can physical activity counteract ageing? *Scand.J.Soc.Med.Suppl* 29:147-152.
75. **Lakhera, S.C., Kain, T.C., Bandopadhyay, P.** (1994)  
Changes in lung function during adolescence in athletes and non-athletes. *J.Sports Med.Phys.Fitness* Sep;34(3):258-262.
76. **Lang, E., Wieluch, W., Weikl, A., Gunther, D.** (1979)  
Examinations of the pulmonary function of untrained and physically trained old men (author's transl). *Aktuelle Gerontol.* 9(9):393-398.
77. **Lehmann, M., Baumgartl, P., Wiesenack, C., Seidel, A., Baumann, H., Fischer, S., Spori, U., Gendrisch, G., Kaminski, R., Keul, J.** (1992)  
Training-overtraining: influence of a defined increase in training volume vs training intensity on performance, catecholamines and some metabolic parameters in experienced middle- and long-distance runners. *Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol* 64(2):169-177.
78. **Lehmann, M., Berg, A., Kapp, R., Wessinghage, T., Keul, J.** (1983)  
Correlations between laboratory testing and distance running performance in marathoners of similar performance ability. *Int.J.Sports Med.* 4(4):226-230.
79. **Lehmann, M., Dickhuth, H.H., Gendrisch, G., Lazar, W., Thum, M., Kaminski, R., Aramendi, J.F., Peterke, E., Wieland, W., Keul, J.** (1991)  
Training-overtraining. A prospective, experimental study with experienced middle- and long-distance runners. *Int.J.Sports Med.* 12(5):444-452.
80. **Lehmann, M., Gastmann, U., Petersen, K.G., Bachl, N., Seidel, A., Khalaf, A.N., Fischer, S., Keul, J.** (1992)  
Training-overtraining: performance, and hormone levels, after a defined increase in training volume versus intensity in experienced middle- and long-distance runners. *Br.J.Sports Med.* 26(4):233-242.

81. **Lehmann, M., Wieland, H., Gastmann, U.** (1997)  
Influence of an unaccustomed increase in training volume vs intensity on performance, hematological and blood-chemical parameters in distance runners. *J.Sports Med.Phys.Fitness* 37(2):110-116.
82. **Leith, D.E., Bradley, M.** (1976)  
Ventilatory muscle strength and endurance training. *J.Appl.Physiol* Oct;41(4):508-516.
83. **Letzelter, M.** (1979)  
Schrittgestaltung im 100-m-Lauf der Männer und Frauen bei den Olympischen Spielen 1976. *Leistungssport* 4299.
84. **Lollgen, H.** (1977)  
Sports and breathing (author's transl). *MMW. Munch.Med.Wochenschr.* 119(49):1585-1590.
85. **Longhurst, J.C., Kelly, A.R., Gonyea, W.J., Mitchell, J.H.** (1980)  
Echocardiographic left ventricular masses in distance runners and weight lifters. *J.Appl.Physiol* 48(1):154-162.
86. **Maffulli, N., Capasso, G., Lancia, A.** (1991)  
Anaerobic threshold and performance in middle and long distance running. *J.Sports Med.Phys.Fitness* 31(3):332-338.
87. **Maffulli, N., Testa, V., Capasso, G.** (1994)  
Anaerobic threshold determination in master endurance runners. *J.Sports Med.Phys.Fitness* 34(3):242-249.
88. **Markworth, P.** (1983)  
*Sportmedizin, Physiologische Grundlagen.* Rowohlt Sport, Reinbek bei Hamburg.
89. **Marti, B., Abelin, T., Minder, C.E.** (1988)  
Relationship of training and life-style to 16-km running time of 4000 joggers. The '84 Berne "Grand-Prix" Study. *Int.J.Sports Med.* 9(2):85-91.
90. **Martin, B.J., Stager, J.M.** (1981)  
Ventilatory endurance in athletes and non-athletes. *Med.Sci.Sports Exerc.* 13(1):21-26.
91. **Massageschule Erlangen.** (1992)  
Eigene Unterlagen.

92. **Maud, P.J., Pollock, M.L., Foster, C., Anholm, J.D., Guten, G., Al Nouri, M., Hellman, C., Schmidt, D.H.** (31-1-1981)  
Fifty years of training and competition in the marathon: Wally Hayward, age 70-a physiological profile. *S.Afr.Med.J.* 59(5):153-157.
93. **McConell, G.K., Costill, D.L., Widrick, J.J., Hickey, M.S., Tanaka, H., Gastin, P.B.** (1993)  
Reduced training volume and intensity maintain aerobic capacity but not performance in distance runners. *Int.J.Sports Med.* 14(1):33-37.
94. **McKelvie, S.J., Valliant, P.M., Asu, M.E.** (1985)  
Physical training and personality factors as predictors of marathon time and training injury. *Percept.Mot.Skills* 60(2):551-566.
95. **McLellan, T.M., Cheung, K.S., Jacobs, I.** (1991)  
Incremental test protocol, recovery mode and the individual anaerobic threshold. *Int.J.Sports Med.* 12(2):190-195.
96. **McLellan, T.M., Jacobs, I.** (1993)  
Reliability, reproducibility and validity of the individual anaerobic threshold. *Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol* 67(2):125-131.
97. **Melanson, E.L., Freedson, P.S., Jungbluth, S.** (1996)  
Changes in VO<sub>2</sub>max and maximal treadmill time after 9 wk of running or in-line skate training. *Med.Sci.Sports Exerc.* Nov;28(11):1422-1426.
98. **Meyer, T., Gabriel, H.H., Kindermann, W.** (1999)  
Is determination of exercise intensities as percentages of VO<sub>2</sub>max or HRmax adequate? *Med.Sci.Sports Exerc.* 31(9):1342-1345.
99. **Mickelson, J.K., Byrd, B.F., III, Bouchard, A., Botvinick, E.H., Schiller, N.B.** (1986)  
Left ventricular dimensions and mechanics in distance runners. *Am.Heart J.* 112(6):1251-1256.
100. **Miyashita, M., Miura, M., Kobayashity, T., Hoshikawa, T.** (1973)  
A study on relation between physical performance and physical resources. In: Cerquiglini, S. u.a. (ed.): *Biomechanics III*. Karger, Basel, New York .
101. **Morganroth, J., Maron, B.J.** (1977)  
The athlete's heart syndrome: a new perspective. *Ann.N.Y.Acad.Sci.* 301:931-941.

102. **Morganroth, J., Maron, B.J., Henry, W.L., Epstein, S.E. (1975)**  
Comparative left ventricular dimensions in trained athletes. *Ann.Intern.Med.* Apr;82(4)521-524.
103. **Morris, R.W. (1993)**  
Bilateral procedures in randomised controlled trials. *JBJS(Br)* 75675-676.
104. **Musshoff, K., Reindell, H. (1988)**  
Röntgenologie: Form und Größenbestimmung des Herzens. In: Reindell, H., Bubenheimer, P., Dickhuth, H.H., Görnandt, L.(Hrsg): Funktionsdiagnostik des gesunden und kranken Herzens. Stuttgart: Thieme 6-12.
105. **Nelson, A.G., Kokkonen, J., Eldredge, C., Cornwell, A., Glickman-Weiss, E. (2001)**  
Chronic stretching and running economy. *Scand.J.Med.Sci.Sports* 11(5):260-265.
106. **Niethard, F.U. (1997)**  
Orthopädie. Hippokrates Verlag, 3.Aufl., Stuttgart .
107. **Novotny, V., Brandejsky, P., BarackovaM, Boudova, L., Vilikus, Z., Streda, A., Novotny, A. (1994)**  
Medical and anthropological study of a world and Olympic champion, long-distance runner, 35 years after the end his racing career. *Sb Lek.* 95(2):139-155.
108. **Nowak, D. (1998)**  
Leitlinien Lungenfunktionsprüfungen in der Arbeitsmedizin. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V.(DGAUM) Lübeck Dez;AWMF.Leitlinien-Register Nr.002/013.
109. **Panidis, I.P., Kotler, M.N., Ren, J.F., Mintz, G.S., Ross, J., Kalman, P. (1984)**  
Development and regression of left ventricular hypertrophy. *J.Am.Coll.Cardiol.* May;3(5)1309-1320. Review.
110. **Pellicia, A., Maron, B.J., Spataro, A., Proschan, M.A., Spirito, P. (1991)**  
The upper limit of physiologic cardiac hypertrophy in highly trained elite athletes. *N.Engl.J.Med.* Jan 31;324(5)295-301.
111. **Pierard, L. (2001)**  
Echocardiography in athletes. *Rev.Med.Liege* May;56(5)313-317.

112. **Pluim, B.M., Zwinderman, A.H., van der Laarse, A., van der Wall, E.E.** (2000)  
The athlete's heart. A meta-analysis of cardiac structure and function.  
*Circulation* Jan25;101(3)336-344.
113. **Quanjer, P.H., Tammeling, G.J., Cotes, J.E., Pedersen, O.F., Peslin, R., Yernault, J.C.** (1993)  
Lung volumes and forced ventilatory flows. Report Working Party  
Standardization of Lung Function Tests, European Community for Steel and  
Coal. Official Statement of the European Respiratory Society. *Eur Respir J*  
Suppl 165-40.
114. **Ranstam, J.** (1998)  
Repeated measurement and analysis units. *Acta Orthop.Scand.* 69(4)345-346.
115. **Raskoff, W.J., Goldman, S., Cohn, K.** (1976)  
The "athletic heart". Prevalence and physiological significance of left ventricular  
enlargement in distance runners. *JAMA* Jul12;236(2)158-162.
116. **Ricci, G., Lajoie, D., Petitclerc, R., Peronnet, F., Ferguson, R.J., Fournier, M., Taylor, A.W.** (1982)  
Left ventricular size following endurance, sprint, and strength training.  
*Med.Sci.Sports Exerc.* 14(5)344-347.
117. **Robert, O., Crapo, M.D.** (1994)  
Pulmonary-function testing. *N.Engl.J.Med.* Jul;331(1)25-30.
118. **Robinson, E.P., Kjeldgaard, J.M.** (1982)  
Improvement in ventilatory muscle function with running. *J.Appl.Physiol*  
52(6):1400-1406.
119. **Röcker, K.** (2002)  
Individuelle Anaerobe Schwelle. [http://www.ergonizer.de/software\\_ias.html](http://www.ergonizer.de/software_ias.html) .
120. **Röcker, K., Schotte, O., Niess, A., Heitkamp, H.C., Dickhuth, H.H.** (1997)  
Laufbandtestdaten und Wettkampfprognosen für den Langstreckenlauf.  
*Dt.Z.Sportmed.* 48(9):315-323.
121. **Röcker, K., Schotte, O., Niess, A.M., Horstmann, T., Dickhuth, H.H.** (1998)  
Predicting competition performance in long-distance running by means of a  
treadmill test. *Med.Sci.Sports Exerc.* 30(10):1552-1557.
122. **Rost, R.** (1982)  
Das Herz des Sportlers im Ultraschall. Schorndorf: Hoffmann .

123. **Roudaut, R., Gosse, P., Dallochio, M.** (1984)  
Echocardiography in the study of left ventricular function.  
Ann.Cardiol.Angeiol.(Paris) Jan;33(1)1-10.
124. **Rubal, B.J., Al-Muhailani, A.R., Rosentswieg, J.** (1987)  
Effects of physical conditioning on the heart size and wall thickness of college women. Med.Sci.Sports Exerc. Oct;19(5)423-429.
125. **Scrimgeour, A.G., Noakes, T.D., Adams, B., Myburgh, K.** (1986)  
The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximum aerobic capacity in marathon and ultramarathon runners. Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol 55(2):202-209.
126. **Shapiro, L.M., Smith, R.G.** (1983)  
Effect of training on left ventricular structure and function. An echocardiographic study. Br.Heart J. Dec;50(6)534-539.
127. **Silbernagl, S., Despopoulos, A.** (1991)  
Taschenatlas der Physiologie. Georg Thieme Verlag, 4.Aufl., Stuttgart, New York .
128. **Simon, G., Dickhuth, H.H., Keul, J.** (1981)  
Echokardiographie zur Funktionsbeurteilung des Herzens. Stuttgart: Enke .
129. **Stegmann, J.** (1991)  
Bestimmung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe der aerob-anaeroben Schwelle. In: Leistungsphysiologie. Georg Thieme Verlag (4. Aufl.):268-270. Stuttgart, New York
130. **Strauzenberg, S.** (1979)  
Grundbedingungen für die Belastungsgestaltung zur gerichteten Beeinflussung der Herz-Kreislauf- und Stoffwechselfunktion bei Erwachsenen durch Freizeit- und Erholungssport. Medizin und Sport 1/236-41.
131. **Sundberg, S., Elovainio, R.** (1982)  
Cardiorespiratory function in competitive endurance runners aged 12-16 years compared with ordinary boys. Acta Paediatr.Scand. 71(6):987-992.
132. **Takeshima, N., Tanaka, K.** (1995)  
Prediction of endurance running performance for middle-aged and older runners. Br.J.Sports Med. Mar;29((1)):20-23.

133. **Tanaka, K., Matsuura, Y.** (1982)  
A multivariate analysis of the role of certain anthropometric and physiological attributes in distance running. *Ann.Hum.Biol.* 9(5):473-482.
134. **Tanaka, K., Matsuura, Y.** (1984)  
Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J.Appl.Physiol* 57(3):640-643.
135. **Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., Kumagai, S., Sun, S.O., Asano, K.** (1984)  
A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med.Sci.Sports Exerc.* 16(3):278-282.
136. **Tanaka, K., Takeshima, N., Kato, T., Niihata, S., Ueda, K.** (1990)  
Critical determinants of endurance performance in middle-aged and elderly endurance runners with heterogeneous training habits. *Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol* 59(6):443-449.
137. **Trampisch, J., Windeler, J.** (1997)  
*Medizinische Statistik.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
138. **Ulmer, W.T., Reichel, G., Nolte, D., Islam, M.S.** (1991)  
*Die Lungenfunktion. Physiologie und Pathophysiologie, Methodik.* Georg Thieme Verlag 5. Auflage. Stuttgart, New York
139. **Urhausen, A., Kindermann, W.** (1987)  
Ein- und zweidimensionale echokardiographische Herzvolumenbestimmung bei Herzgesunden im Vergleich zur röntgenologischen Methode und zu spiroergometrischen Parametern. *Herz/Kreislauf* 19525-528.
140. **Verde, T., Thomas, S., Shephard, R.J.** (1992)  
Potential markers of heavy training in highly trained distance runners. *Br.J.Sports Med.* 26(3):167-175.
141. **Vollmer-Larsen, A., Vollmer-Larsen, B., Kelbaek, H., Godtfredsen, J.** (1989)  
The veteran athlete: an echocardiographic comparison of veteran cyclists, former cyclists and non-athletic subjects. *Acta Physiol.Scand.* Mar;135(3)393-398.
142. **Weineck, J.** (1990)  
*Optimales Training, Leistungsphysiologische Trainingslehre.* perimed Fachbuch, 7.Aufl., Erlangen.

143. **Williams, D.S., III, McClay, I.S., Hamill, J.** (2001)  
Arch structure and injury patterns in runners. *Clin.Biomech.(Bristol., Avon.)*  
16(4):341-347.
144. **Wolfe, L.A., Cunningham, D.A., Rechnitzer, P.A., Nichol, P.M.** (1979)  
Effects of endurance training on left ventricular dimensions in healthy men.  
*J.Appl.Physiol Jul;47(1)207-212.*
145. **Zamparo, P., Perini, R., Peano, C., di Prampero, P.E.** (2001)  
The self selected speed of running in recreational long distance runners.  
*Int.J.Sports Med.* 22(8):598-604.

## **Danksagung**

Herrn PD Dr. med. Kai Röcker möchte ich für die freundliche Überlassung des Themas dieser Dissertation und seine hilfreiche Unterstützung herzlichen Dank sagen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Archivs für die Arbeit mit den vielen Akten und bei Renate Fröhlich für das zur Verfügung stellen ihres Arbeitsplatzes.

Ganz besonderer Dank gilt Volker für alle Mühe und Hilfe in Zusammenhang mit dem Werden dieser Dissertation sowie Siegfried Franz für die unermüdliche Unterstützung in allen Computerfragen.

## Curriculum Vitae

Gisela Kempter

- 08.05.1973 geboren in Heimenkirch/Allgäu  
Eltern: Josef und Genovefa Kempter, geb. Leipolz,  
Landwirte  
Vier Brüder, zwei Schwestern
- 1979-1984 Grund- und Teilhauptschule in Heimenkirch  
1984-1989 Staatl. Realschule in Lindenberg  
1989-1991 Fachoberschule in Lindau, Technischer Zweig. Abschluss: Allgemeine  
Fachhochschulreife  
1991-1994 Berufsausbildung zur Staatl. anerkannten Masseurin und med.  
Bademeisterin in Erlangen  
1994-1996 Berufsoberschule in Augsburg, Sozialer Zweig. Abschluss: Allgemeine  
Hochschulreife
- WS 1996/97 Zulassung zum Studium der Humanmedizin an der Universität des  
Saarlandes in Homburg/Saar
- 17.09.1998 Ärztliche Vorprüfung  
1998-1999 University College Dublin / Irland  
23.03.2000 Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung an der Eberhard-Karls-  
Universität zu Tübingen  
10.09.2001 Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung  
1999/2000 Famulaturen auf den Gebieten Gynäkologie, Sportmedizin, Chirurgie,  
Pädiatrie (in Uganda), Anästhesiologie  
29.04.2003 Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung