

Aus dem Forschungsbereich Sport- und Bewegungsmedizin
Fachbereich Sportwissenschaft
der Universität Hamburg
Leiter: Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann

**Nutzung der Atemgasanalyse zur Bestimmung
technischer und metabolischer Fähigkeiten bei
Schwimmerinnen und Schwimmern im
Leistungssport**

INAUGURAL – DISSERTATION

zur

Erlangung des doctor medicinae
dem Fachbereich Medizin der
Universität Hamburg

vorgelegt von
Chris-Carol Bremer
aus Hannover
2003

Angenommen vom Fachbereich
Medizin der Universität Hamburg
am: 28. Mai 2004

Veröffentlicht mit Genehmigung
des Fachbereichs Medizin der
Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der/die
Vorsitzende: Prof. Dr. K.-M. Braumann

Prüfungsausschuss: 2. Gutachter/in: Prof. Dr. K. Püschel

Prüfungsausschuss: 3. Gutachter/in: Priv. Doz. Dr. A. Meyer

Aus dem Forschungsbereich Sport- und Bewegungsmedizin
Fachbereich Sportwissenschaft
der Universität Hamburg
Leiter: Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann

**Nutzung der Atemgasanalyse zur Bestimmung
technischer und metabolischer Fähigkeiten bei
Schwimmerinnen und Schwimmern im
Leistungssport**

INAUGURAL – DISSERTATION

zur

Erlangung des doctor medicinae
dem Fachbereich Medizin der
Universität Hamburg

vorgelegt von
Chris-Carol Bremer
aus Hannover
2003

Meinen Eltern in Dankbarkeit gewidmet.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1 Überblick über das Thema	1
1.2 Bedeutung des Themas	2
1.3 Überblick über die Konzepte Transportkosten (energy cost), Wirkungsgrad (efficiency) und Wasserwiderstand (active drag)	6
1.4 Modelle zur Beschreibung der Leistungsabgabe	10
1.5 Ziel und Fragestellung der Studie	11
2. Untersuchungsgut und Methoden	12
2.1 Probanden	12
2.2 Untersuchungsablauf	14
2.3 Statistische Methoden	18
2.4 Kritik der Methoden	19
3. Ergebnisse	23
3.1 Messdaten	23
3.1.1 Sauerstoffverbrauch in Ruhe pro kg (LBM)	23
3.1.2 Netto-Sauerstoffverbrauch	24
3.1.3 Netto-Leistung bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	25
3.1.4 Herzfrequenz bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	26
3.1.5 Blutlaktatwerte bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	27
3.1.6 Zyklusfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	29
3.1.7 Zyklusfrequenzen getrennt nach Leistungsgruppen	30
3.1.8 Graphischer Vergleich von Änderungen der Leistung, Herzfrequenz, Zyklusfrequenz und Laktat mit der Geschwindigkeit	31

3.1.9 Vergleich der Messgrößen "Leistungsabgabe" und "Laktat" am Beispiel	32
3.2 Mathematische Modelle der Leistungsabgabe	34
3.2.1 Individueller Verlauf der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit	34
3.2.2 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit	35
3.2.3 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe in Relation zur LBM ('lean body mass')	37
3.2.4 Individuelle Faktoren ' A_{LBM} ' und ' $b+1$ ' des mathematischen Modells	39
3.2.5 Faktoren A_{LBM} und ' $b+1$ ' im Vergleich	40
3.2.6 Technik-Index	41
3.2.7 Vergleich des Technik-Indexes Z_T mit A_{LBM} und ' b '	42
3.3 Analyse der Faktoren A_{LBM} , b und Z_T	43
3.3.1 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für Sprinter, Mittel- und Langstreckler	43
3.3.2 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für männliche und weibliche Schwimmer	44
3.3.3 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Art des Beinschlages	45
3.3.4 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Alter	45
3.3.5 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Leistungsklassen bzw. FINA-Punktezahl	46
3.3.6 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für drei Kategorien des Frequenzverhaltens	48
3.3.7 Größe der Sportler in den verschiedenen Kategorien des Frequenzverhaltens	50
3.3.8 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T unterteilt nach Kategorien der Körpergrößen	50
3.3.9 Korrelationskoeffizienten der Kovarianzen für verschiedene Merkmale	51
3.4 Parameter der maximalen Leistungsabgabe	52
3.4.1 Maximale Sauerstoffaufnahme	52

4. Diskussion	54
4.1 Messdaten	54
4.1.1 Ruhesauerstoffverbrauch im Wasser	54
4.1.2 Bedeutung des Netto-Sauerstoffverbrauchs	55
4.1.3 Netto-Leistung bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	58
4.1.4 Herzfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	59
4.1.5 Blutlaktatwerte bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	60
4.1.6 Zyklusfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen	62
4.1.7 Zyklusfrequenzen getrennt nach Leistungsgruppen	63
4.1.8 Graphischer Vergleich von Änderungen der Leistung, Herzfrequenz, Zyklusfrequenz und Laktat mit der Geschwindigkeit	65
4.1.9 Vergleich der Messgrößen “Leistungsabgabe“ und “Laktat“ am Beispiel	68
4.2 Mathematische Modelle der Leistungsabgabe	69
4.2.1 Individueller Verlauf der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit	69
4.2.2 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit	71
4.2.3 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe in Relation zur LBM (‘lean body mass’)	73
4.2.4 Faktoren A_{LBM} und ‘b’ im Vergleich	75
4.2.5 Vergleich des Technik-Indexes Z_T mit A_{LBM} und ‘b’	78
4.2.6 Theoretische Grundlagen	79
4.2.7 Theoretische Zusammenhänge	81
4.3 Analyse der Faktoren A_{LBM} , b und Z_T	83
4.3.1 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für Sprinter, Mittel- und Langstreckler	83
4.3.2 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für männliche und weibliche Schwimmer	85
4.3.3 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Art des Beinschlags	87
4.3.4 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Alter	88
4.3.5 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Leistungsklassen	88

Inhaltsverzeichnis	IV
4.3.6 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für drei Kategorien des Frequenzverhalten	92
4.3.7 Größe der Sportler in den verschiedenen Kategorien des Frequenzverhaltens	93
4.3.8 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T unterteilt nach Kategorien der Körpergrößen	94
4.3.9 Korrelationskoeffizienten der Kovarianzen für verschiedene Merkmale	94
4.4 Parameter der maximalen Leistungsabgabe	96
4.4.1 Maximale Sauerstoffaufnahme	96
4.5 Abschließende Diskussion	99
4.5.1 Mechanischer Wirkungsgrad	99
4.5.2 Mathematisches Modell der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit	99
4.5.3 Faktoren A_{LBM} und b	101
4.5.4 Technikindex Z_T	102
4.5.5 Vor- und Nachteile der Atemgasanalyse gegenüber der Laktatbestimmung	103
4.5.6 Unterschiede der Faktoren A_{LBM} und b in verschiedenen Gruppen	105
4.5.7 Zyklusfrequenzen und Zykluswege/Zuglängen	107
4.5.8 Ausblick	109
5. Zusammenfassung	111
5.1 Zusammenfassung: deutsch	111
5.2 Summary: English	112
6. Literaturverzeichnis	113
7. Anhang	128
7.1 Muster des Belastungsprotokolls	129
7.2 Muster der Einverständniserklärung	130
8. Danksagung	131

9. Lebenslauf

1. Einleitung

1.1 Überblick über das Thema

Die Sauerstoffaufnahme ist ein Maß für die aerobe Brutto-Energiebereitstellung des Körpers und somit auch die Brutto-Leistung, die der Körper erzeugt (7,57,116,137,141,142). Nur ein kleiner Teil dieser Energie oder Leistung wird aber in Vortrieb umgewandelt, der Rest geht in andere Formen von Energie über, die nicht direkt oder gar nicht zum Vortrieb beitragen (7,70,71,135).

Schon beim Umsatz von chemischer Energie in Muskelbewegung, also der Energieübertragung von ATP auf Aktomyosin, geht ein Teil der Energie in Wärmeenergie über und somit für die Nutzbarkeit im Sinne der Bewegung verloren (**chemischer Wirkungsgrad**) (14,78,114). Energie geht auch für lebenserhaltende Systeme ‚verloren‘, wie z.B. Zirkulation, Atmung, Verdauung und körperstabilisierende Muskulatur, was durch die Begriffe **Brutto- oder Nettoenergie bzw. -leistung** beschrieben wird (114). Darüber hinaus geht Energie als Reibung ‚verloren‘, wenn Muskeln gegeneinander arbeiten, dies im Wesentlichen in Form von Wärme (thermische Energie) (70). Der Ausdruck ‚Energieverlust‘ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Energie nicht mehr zum Vortrieb, also für die Bewegung, zur Verfügung steht.

Nach dem Satz der Energieerhaltung gilt: Die Summe aller Energien, einschließlich der thermischen Energie, ist für ein abgeschlossenes System konstant. Dies bedeutet, dass Energie nie verloren, sondern lediglich in andere Formen umgewandelt wird. Im Schwimmen von großer Bedeutung ist die Energie, die als bewegtes Wasser, also kinetische Energie, für den Vortrieb verloren geht (7,70,135,148). Der Schwimmer überträgt dabei die Energie auf das Wasser, indem er eine bestimmte Masse Wasser über

einen bestimmten Weg beschleunigt (Energie = Masse * Beschleunigung * Weg). Ein Teil dieser Energie geht für den Vortrieb verloren, während die Formierung von Vortices (rotierende Wassermassen) eine bessere Ausgangslage für den Abdruck des Körpers vom Wasser schaffen kann (150,151). Diese Vortices, wie sie zuerst für schwimmende Tiere beschrieben wurden (155), zu generieren, kann als technische Fähigkeit betrachtet werden und unterscheidet gute von schlechten Schwimmern (150,151).

Ein anderer Teil der Energie wird dafür aufgewendet, den Körper gegen die Erdanziehungskraft in einer höheren Wasserposition zu halten, als es passiv der Fall wäre. Dieser Energieanteil ist für den Vortrieb ebenfalls nicht vollständig verloren, da er den Energieverbrauch für den Vortrieb mindern kann (7).

Das Verhältnis von mechanisch erzeugter Leistung zu metabolischer Leistung wird als **mechanischer Wirkungsgrad** (mechanical or gross efficiency) bezeichnet (62,71,108,115,142). Mit dem **Antriebswirkungsgrad** (propelling efficiency) wird das Verhältnis der Leistung, die zur Überwindung des Wasserwiderstandes genutzt wird, zur mechanisch erzeugten Leistung beschrieben (9,139,141). Das Produkt von Antriebswirkungsgrad und mechanischem Wirkungsgrad ergibt den sogenannten **Schwimm-Wirkungsgrad** (swimming efficiency) (71,139,141).

1.2 Bedeutung des Themas

Wenn die Leistungsfähigkeit eines Schwimmers, z.B. im Rahmen einer Leistungsdiagnostik (KLD), beschrieben und in ihren einzelnen Komponenten betrachtet wird, werden dafür häufig metabolische und physikalische Messgrößen wie maximale Sauerstoffaufnahme, Laktatverhalten und Kraft verwendet (119).

Es werden natürlich auch technische Fähigkeiten erfasst, aber die Beurteilung ist trotz des Einsatzes moderner Messtechnik immernoch subjektiv. Ein inter- oder intraindividueller Vergleich wird oft nur optisch erhoben, ohne dass Unterschiede in Zahlen ausgedrückt werden können. Experten bewerten dabei das zwei- oder dreidimensionale Bewegungsbild vom Beckenrand oder Sichtfenster des Schwimmkanals aus. Diese Bewegungsmuster orientieren sich an Idealen erfolgreicher Schwimmer, die sich über die Jahre aber auch verändern. Individuelle Voraussetzungen können dabei nicht immer mit berücksichtigt werden. Am Olympiastützpunkt Hamburg/Kiel ist ein computergestütztes 3D Programm in der Erprobung, welches die Schwimmbewegung dreidimensional aufzeichnet und den errechneten Bewegungsablauf später aus allen Perspektiven wiedergeben kann. Die Errechnung dieser Daten ist aber immer noch sehr aufwendig und daher noch nicht für die Routine geeignet. Viel wichtiger erscheint jedoch, dass kleinste Veränderungen so nicht erfasst werden können. Die Fähigkeit, den Wasserdruck auf der Hand zu behalten, zeichnet sich durch kleinste Veränderungen der Handhaltung und deren Beschleunigung aus, die optisch direkt schwer zu erfassen sind. Ungerechts (150,151) beschreibt die Möglichkeit Vortices, wie sie vom Schwimmer erzeugt werden, zu verfolgen und daraus technische Fähigkeiten abzuleiten. Counsilman (27,28) stellte als erstes die Theorie auf, dass der Weg der Hand nicht gerade nach hinten geht, sondern einem kurvenförmigen Verlauf folgt, der gewährleistet, dass die Hand sich immer in unbewegtem Wasser bewegt. Die Tatsache, ob sich das Wasser bewegt oder nicht, kann, außer optisch über Vortices, nur schwer erfasst werden, sondern muss bei jedem Zug individuell vom Schwimmer "erfühlt" werden. Schleihau (122,123) beschreibt als erster, dass ständige Veränderungen der Handposition, als optimale Anpassung an die jeweilige Notwendigkeit Vor- und/oder Antriebskräfte zu erzeugen, das "Gefühl" für das Wasser bei einem guten Schwimmer ausmachen. Selbst wenn man technisch die Handposition zu jedem Zeitpunkt der Bewegung erfassen könnte,

wären die zu verarbeitenden Datenmengen riesig. Letztendlich ist die Handposition auch nur sinnvoll zu bewerten, wenn man gleichzeitig die Stellung anderer großer Gelenke mitbewertet.

In der Literatur ist die Bedeutung der Technik unumstritten (137,141,142,146,150,152,157), denn im Gegensatz zu anderen Sportarten, kann sich der Schwimmer nicht von einer festen Grundlage abstoßen, sondern muss sich das Widerlager, von dem er sich abdrücken kann, erst selber schaffen. Jeder Trainer weiß dies, aber es entsteht manchmal der Eindruck, dass die Messgrößen wie Kraft, Sauerstoff und Laktat gegenüber der komplexen und nicht immer objektiv bestimmbar Größe Technik in den Vordergrund treten, weil man sich für den täglichen Trainingsbetrieb lieber an objektivierbaren Daten orientiert. Die Messgröße „Technik“ beinhaltet genau genommen die Raumbahnen der Bewegungen aller Körperteile eines Schwimmers, den zeitlichen Ablauf dieser Bewegungen auch im Verhältnis zueinander, Beschleunigungen und Kräfte. Eine genaue Messung aller dieser einzelnen Parameter scheint unrealistisch.

Die Vorgaben für das Training orientieren sich demnach auch viel stärker an Belastungsumfängen und Intensitäten als an optimaler technischer Ausführung (z.B. in den jährlich ausgegebenen Rahmentrainingsplänen des Deutschen Schwimm-Verbandes).

Die Belastungsumfänge und –intensitäten genauso wie metabolische Leistungsfähigkeit stoßen jedoch im heutigen Hochleistungssport bereits an Grenzen (57), so dass andere Wege gesucht werden müssen, um Leistungen zu verbessern.

Mit Wirkungsgraden können objektiv technische Fähigkeiten beschrieben werden, sowie inter- und intraindividuelle Vergleiche erhoben werden. Dies soll Trainer und Athleten dazu motivieren, vorrangig vor Umfang und Geschwindigkeiten die technische Ausführung zu optimieren. Während der Wirkungsgrad z.B. im Radfahren für geübte und ungeübte Sportler praktisch identisch bei ca. 25% liegt (57), hat er im Schwimmen eine

herausragende Bedeutung und man findet Unterschiede von mehr als 100% zwischen ungeübten (3% und weniger) und geübten Schwimmern (bis zu 6% Schwimm-Wirkungsgrad) (139,141,142).

Toussaint (147) führt aus, dass eine 10%ige Verbesserung von anaerober oder aerober Stoffwechselkapazität jeweils eine leichte Verbesserung der Schwimgeschwindigkeit entweder auf der Kurz- oder auf der Langstrecke mit sich bringt. Eine 10%ige Verbesserung des Schwimm-Wirkungsgrades jedoch, bei gleichbleibenden sonstigen Voraussetzungen, würde eine deutlich größere Leistungsverbesserung sowohl in Sprint- als auch in Langstrecken bedeuten (147). Überschlagsmäßig können man errechnen, dass eine 10%ige Steigerung der anaeroben energiebereitstellenden Systeme bei einer Belastungsdauer von 2 Minuten, was in etwa einem 200m Rennen entspricht, eine 0,25%ige Steigerung der End-Leistung (= Schwimgeschwindigkeit) bedeuten würde, da die anaerobe Energiebereitstellung bei einer Belastungslänge von 2 Minuten ca. 50% der gesamten Energiebereitstellung ausmacht ($10\% * 50\% \text{ anaerober Anteil} * 5\% \text{ Schwimm-Wirkungsgrad} = 0,25\%$). Genauso würde eine Steigerung der aeroben Energiebereitstellung ausfallen ($10\% * 50\% \text{ aerober Anteil} * 5\% \text{ Schwimm-Wirkungsgrad} = 0,25\%$). Eine 10%ige Steigerung des Schwimm-Wirkungsgrades würde jedoch eine 0,5%ige Steigerung der Leistungsabgabe bedeuten ($10\% * 100\% \text{ aerober und anaerober Anteil} * 5\% \text{ Schwimmwirkungsgrad} = 0,5\%$), also doppelt so hoch wie bei einer der anderen Varianten. Wenn also die Verbesserung durch diese drei erwähnten Varianten gleich aufwendig wäre, würde sich eine Verbesserung der Technik am meisten lohnen.

Wirkungsgrade erlauben es außerdem, zwischen technischen und metabolischen Leistungsverbesserungen zu unterscheiden, was mit Laktatanalysen allein nicht möglich ist. Eine 'Rechtsverschiebung' der Laktatkurve kann entweder durch eine Verbesserung von technischen oder aber metabolischen Fähigkeiten bedingt sein. Mit Wirkungsgraden

lässt sich diese Unterscheidung leicht treffen, denn eine Verbesserung des Wirkungsgrades zeigt immer eine Verbesserung der technischen Fähigkeiten an, während eine verbesserte metabolische Leistungsfähigkeit daran zu erkennen ist, dass größere Energiemengen erzeugt werden (79). Eine Unterscheidung ist aber von großer Bedeutung für das Training, denn schlechte metabolische Leistungsfähigkeit kann vor allem mit mehr Training verbessert werden, während eine Erhöhung von Trainingsumfang und Intensität für die Entwicklung technischer Fähigkeiten eher hinderlich ist.

Die Unterscheidung zwischen technischen und metabolischen Fähigkeiten könnte besonders bei jüngeren Schwimmern wertvoll sein, wenn man beurteilen soll, ob die metabolische Leistungsfähigkeit bereits ausgereizt ist oder im Gegensatz dazu einfach die technischen Fähigkeiten hervorragend sind und eine weitere Steigerung durch Verbesserung der metabolischen Parameter noch möglich ist.

1.3 Überblick über die Konzepte Transportkosten (energy cost), Wirkungsgrad (efficiency) und Wasserwiderstand (active drag)

Es sind verschiedene Ansätze in der Literatur bekannt, die sich mit den Konzepten von Transportkosten, Wirkungsgraden und Wasserwiderständen beschäftigen. Sowohl das Konzept der Transportkosten (energy cost), als erstes von di Prampero und dann Pendergast (108,111) beschrieben, genauso wie das Konzept der Wirkungsgrade (efficiency), unter anderem von Toussaint (137,141,142) veröffentlicht, als auch das verwandte Konzept des Wasserwiderstandes (active drag) (55,73,137,149), beschreiben Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen (Freizeitschwimmer und Leistungsschwimmer, Triathleten und Schwimmer, Lang-, Mittel- und

Kurzstreckenschwimmer). Eine Anwendung im Sinne einer Leistungsdiagnostik für Individuen zur Beobachtung einer Entwicklung nach gezielten Trainingsreizen oder zum Vergleich mit Standards ist grundsätzlich möglich, hat sich aber bis jetzt in der Praxis nicht durchgesetzt. Gründe dafür könnten sein, dass Ungenauigkeiten der Messsysteme zu groß waren oder andererseits die Ergebnisse keine validen Informationen für die individuelle Leistungsfähigkeit liefern konnten, bzw. auch hier intraindividuelle Schwankungen zu groß waren.

Die 'energy cost' wird von di Prampero (111) als Energieverbrauch pro Strecke definiert und in ml Sauerstoffverbrauch pro Meter ($\text{ml O}_2 \cdot \text{m}^{-1}$) angegeben. Bei den geschwommenen Geschwindigkeiten von 0,55 und 0,9 m/s ermittelt er einen durchschnittlichen Verbrauch von $58,5 \text{ ml O}_2 \cdot \text{m}^{-1}$, unabhängig von der Geschwindigkeit. Die Körperdimensionen der Probanden bleiben dabei völlig unberücksichtigt und auch die früher vertretene Meinung, dass bei höheren Geschwindigkeiten wie im Wettkampfsport die 'energy cost' unabhängig von der Geschwindigkeit ist, ist heute überholt. Dass die 'energy cost' mit der Geschwindigkeit ansteigt, ist mittlerweile unumstritten (55,62), alleine die Form des Anstiegs ist fraglich.

Es ist allgemein üblich, die Leistungsfähigkeit von Personen in $\text{ml O}_2/\text{kg Körpergewicht} \cdot \text{min}^{-1}$ anzugeben; man spricht dann von der relativen Sauerstoffaufnahme (57,77,114). Diese relative Sauerstoffaufnahme erlaubt einen Vergleich der Leistungsfähigkeit von Personen unterschiedlichen Geschlechts oder Gewichtes. Eine noch bessere Vergleichbarkeit findet man, wenn man statt des Körpergewichtes die fettfreie Körpermasse (lean body mass) berücksichtigt (95). Die fettfreie Körpermasse hat eine höhere Korrelation zur Muskelmasse, welche ja im wesentlichen für die Leistungsfähigkeit eines Sportlers verantwortlich ist und es hat sich herausgestellt, dass auch

Geschlechtsunterschiede bezogen auf die relative Leistungsfähigkeit nicht mehr signifikant sind, sofern sie auf die fettfreie Körpermasse bezogen werden (57,95).

Die 'swimming efficiency' (Schwimmwirkungsgrad) wird von Toussaint definiert als Verhältnis von Energie, die zur Überwindung des Wasserwiderstandes aufgewendet wird, zur gesamten erzeugten Energie (50,68,71,138,139,141). Die 'swimming efficiency' setzt sich wie vorher beschrieben aus den beiden Faktoren 'mechanical efficiency' (mechanischer Wirkungsgrad) und 'propelling efficiency' (Antriebswirkungsgrad) zusammen, wobei sich offensichtlich nur letzterer zwischen guten und schlechten Schwimmern unterscheidet (139,141,142). Die 'mechanical' oder 'gross efficiency' liegt für gute und schlechte Schwimmer bei konstant 9,5%. Der mechanische Wirkungsgrad ist als Verhältnis von mechanisch erzeugter Leistung zur metabolisch aufgewendeten Leistung definiert und schon in vielen Fortbewegungsarten an Land (Laufen, Radfahren, Eisschnelllaufen) hat sich gezeigt, dass der mechanische Wirkungsgrad nicht signifikant unterschiedlich für geübte und ungeübte Sportler ist. Ein gutes Beispiel ist das Radfahren (57), wo mechanisch erzeugte Energie praktisch ohne Verlust in Vortrieb umgesetzt wird und wo die Wirkungsgrade zwischen geübten und ungeübten Sportlern nicht signifikant unterschiedlich sind (115). Die mögliche Interpretation ist, dass die Umsetzung von metabolischer Energie in Muskelarbeit und Vortrieb für unterschiedliche Individuen sehr ähnlich ist, wenn man eine gewisse Übung der Bewegung voraussetzt. Es ist auch bekannt, dass es kleine Unterschiede im mechanischen Wirkungsgrad gibt, die zwar in den betrachteten Gruppen nicht signifikant sind, sich im Hochleistungsbereich aber auf die maximal erreichbare Leistung auswirken können (115).

Toussaint ermittelt Unterschiede in der 'propelling efficiency' zwischen Triathleten (44%) und Schwimmern (61%) (142) und erkennt, dass die 'propelling efficiency' ein Maß für die technischen Fähigkeiten eines Schwimmers ist. Cappaert beschreibt Unterschiede in

der 'propelling efficiency' zwischen Sprintern (48%), Mittelstrecklern (56%) und Langstrecklern (62%) (9), aber es sind bis jetzt keine Vergleiche von Individuen bekannt. Die Messung der 'propelling efficiency' bedient sich außerdem eines sogenannten MAD-Systems („**M**asurement of **A**ctive **D**rag system'), bei dem sich die Schwimmer unter Wasser von festen Platten abstoßen können. Dabei sollen die optischen Unterschiede zum normalen Schwimmen vernachlässigbar sein, die Vergleichbarkeit zum freien Schwimmen ist aber doch zumindest fraglich (138,139, 141,142).

Wasserwiderstand ist in der angelsächsischen Literatur unter 'water resistance' oder 'active drag' bekannt. Während man anfangs des Jahrhunderts noch passive Wasserwiderstände durch Schleppen von Personen hinter Ruderbooten ermittelte (39), werden heute aktive Wasserwiderstände ermittelt (66,111,149), bei denen man annimmt, dass der Widerstand des aktiv schwimmenden Körpers anders ist als der von passiven Körpern. Die bekannten Theorien gehen davon aus, dass der aktive Wasserwiderstand (F_d) proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist ($F_d=A*v^2$) (7,20,29,43,73). Die ermittelten Wasserwiderstands-Faktoren (A) liegen für Männer bei durchschnittlich 30 und für Frauen bei 24 (147). Es wurde gemutmaßt, dass diese Unterschiede der unterschiedlich großen Frontfläche zuzuschreiben sind (68), wogegen jedoch wieder andere Untersuchungsergebnisse derselben Autoren sprachen, denn eine Längsschnittuntersuchung bei Kindern, deren Frontfläche im Wachstum um 16% wuchs, zeigte keine Veränderungen der Wasserwiderstands-Faktoren (A) (143). Es sind jedoch keine Vergleiche von Widerstandsfaktoren für einzelne Individuen veröffentlicht, was erst sinnvoll ist, wenn man einen für die 'Größe' der Individuen korrigierenden Faktor einführt. Außerdem ist nicht endgültig geklärt, ob der Widerstandsfaktor wie angenommen unabhängig von der Geschwindigkeit ist.

1.4 Modell zur Beschreibung der Leistungsabgabe

Die Leistung (P) ist eine Funktion der Form $P = F_d * v$, also abhängig vom aktiven Wasserwiderstand (F_d) und der Geschwindigkeit (v) (62,93,111).

Der aktive Wasserwiderstand oder 'body drag' (F_d) ist wiederum von der Geschwindigkeit abhängig. Manche Autoren haben festgestellt, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten zwischen 1,1 und 1,4 m/s der Wasserwiderstand nur proportional zur 1. Potenz der Geschwindigkeit (v) ist ($F_d = A * v$) (20,111), während andere Autoren bei einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,0 und 2,5 m/s festgestellt haben, dass der Wasserwiderstand proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist ($F_d = A * v^2$) (7,43,91). Neuerdings hat Toussaint eine Funktion der Form $F_d = A * v^b$ eingeführt (136,137,138), um die Abhängigkeit des Wasserwiderstandes von der Geschwindigkeit zu beschreiben. Der Autor ermittelte dabei für den Exponenten 'b' bei unterschiedlichen Individuen Werte zwischen 1,67 und 2,83 und einen Mittelwert von 2,15. Dies bedeutet, dass der aktive Wasserwiderstand individuell unterschiedlich stark mit steigender Geschwindigkeit wächst. Eine weitere Erklärung über eventuelle Gründe für diese Unterschiede liefert der Autor in seinen Publikationen nicht. Man muss außerdem berücksichtigen, dass diese Messungen mit einem sogenannten MAD-System ermittelt wurden, das nicht immer mit dem freien Schwimmen zu vergleichen ist.

Wir haben als mathematisches Modell die Funktion, wie von Toussaint (136,137,138) beschrieben ($F_d = A * v^b$), gewählt. Für die Leistung ergibt sich entsprechend die Funktion $P = A * v^{b+1}$, da $P = F_d * v$.

Der Faktor 'A' ist ein sogenannter Widerstandsfaktor und 'b' beschreibt wie stark der Wasserwiderstand bzw. die Leistung mit der Geschwindigkeit ansteigt.

1.5 Ziel und Fragestellung der Studie

Hauptziel der Studie ist es durch Zuordnung von individueller metabolischer Leistung und Schwimmgeschwindigkeit ein oder mehrere Parameter zu identifizieren, welche die Fähigkeit, sich ökonomisch im Wasser zu bewegen, beschreiben und die im Sinne einer Leistungsdiagnostik nutzbar sind.

Weitere Ziele sind es, sofern die oben genannten Parameter identifiziert werden können, die Bedeutung von ökonomischen Fähigkeiten (oder Technik im weitesten Sinne) für die Wettkampfleistung und Unterschiede in den Parametern der Ökonomie für verschiedene Untergruppen zu untersuchen. Von besonderer Bedeutung soll dabei sein, Charakteristika zu identifizieren, die gute Schwimmer von durchschnittlichen oder schlechten unterscheiden.

Zusätzliche Ziele sind, die Vor- und Nachteile der Atemgasanalyse mit denen von z.B. Laktattests zu vergleichen und weitere Anstöße zu geben, wie in Zukunft Leistungsdiagnostik sinnvoll weiterentwickelt werden kann. Ebenfalls sollen Schlussfolgerungen für eine adäquate Gestaltung von Trainingsinhalten, die sich aus den Ergebnissen ergeben, diskutiert werden.

2. Untersuchungsgut und Methoden

2.1 Probanden

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden 23 Sportlerinnen und Sportler (15 weiblich, 8 männlich) untersucht. Das durchschnittliche Alter betrug zum Zeitpunkt der Untersuchung $16,7 \pm 3,5$ Jahre (weiblich: $16,0 \pm 2,9$; männlich: $17,9 \pm 4,2$), wobei der älteste Sportler 27 Jahre und die jüngste Sportlerin 14 Jahre alt waren. Die Körpergröße betrug durchschnittlich $173,3 \pm 10,2$ cm (weiblich: $169,0 \pm 8,4$ cm; männlich: $179,9 \pm 9,4$ cm) bei einem Körpergewicht von $63,3 \pm 9,9$ kg (weiblich: $59,4 \pm 7,9$ kg; männlich: $70,2 \pm 9,4$ kg). Der durchschnittliche Körperfettanteil gemessen nach Parizkova (103) betrug $15,9 \pm 4,4$ % (weiblich: $17,8 \pm 3,7$ %; männlich: $13,1 \pm 4,0$ %), woraus sich eine durchschnittliche 'lean body mass' (LBM) von $53,7 \pm 9,9$ kg (weiblich: $48,8 \pm 6,3$ kg; männlich: $61,2 \pm 10,1$ kg) ergibt. Es handelte sich bei den Probanden um Schwimmer des Gothenburg Swim Clubs (Schweden) und der SG Hamburg. Alle Schwimmer gehörten zur Leistungsgruppe in ihrem Verein und haben die Pflichtzeiten für nationale Meisterschaften in ihrer Altersklasse erreicht; die durchschnittliche Leistung nach der FINA-Tabelle betrug 670 ± 118 Punkte (weiblich: 685 ± 114 ; männlich: 647 ± 127).

Sportler	Größe (cm)	Gewicht (kg)	Körperfett (%)	LBM (kg)	Alter	FINA-Punkte	Trainingsjahre	Trainings-einheiten /Woche	Geschlecht (m/w)	S/M/L (Sprinter/Mittel-/Langstreckler)
1	177	63,2	16,3	52,9	18	888	10	10	w	M
2	174	62,5	15,3	52,9	18	778	8	10	w	S
3	177	63,0	12,7	55,0	18	570	8	11	m	L
4	183	70,3	20,0	56,2	24	893	16	6	w	M
5	155	48,6	17,9	39,9	15	501	6	6	w	M
6	164	49,3	16,1	41,4	14	581	6	6	w	L
7	171	68,7	22,2	53,4	19	765	13	10	w	S
8	180	64,0	15,1	54,3	15	492	8	7	m	S
9	166	60,1	13,0	52,3	15	504	8	7	m	S
10	168	60,4	18,2	49,4	15	659	5	10	w	S
11	180	64,8	9,7	58,5	16	645	11	10	w	L
12	197	88,2	10,2	79,2	18	689	7	9	m	S
13	172	68,3	23,0	52,6	15	643	7	8	w	L
14	174	57,2	16,4	47,8	14	751	6	8	w	M
15	166	64,4	19,0	52,2	14	628	6	8	w	M
16	188	76,0	10,8	67,8	22	807	15	8	m	S
17	169	60,1	19,0	48,7	14	719	5	9	w	L
18	161	55,2	22,4	42,8	14	606	9	9	w	L
19	183	73,2	11,1	65,1	17	703	12	9	m	M
20	183	76,5	6,9	71,2	27	814	17	10	m	L
21	164	48,6	13,3	42,1	14	633	6	8	w	L
22	157	50,4	18,7	41,0	14	620	6	8	w	S
23	176	70,8	18,9	57,4	15	527	6	8	m	S
Durschnitt	173,3	63,6	15,9	53,7	16,7	670	8,7	8,5		
SD	10,2	9,9	4,4	9,9	3,5	117,8	3,6	1,4		

Tabelle 1: Datensammlung der Sportlergruppe (einschließlich anthropometrische Daten).

Die Teilnahme an der Studie war freiwillig. Jeder Teilnehmer (bzw. dessen Erziehungsberechtigte) wurde vor der Studie über den Ablauf der Untersuchungen und Tests aufgeklärt und es wurde das schriftliche Einverständnis (siehe Anhang 8.2) eingeholt. Es wurde darauf hingewiesen, dass jeder Proband die Studie zu jedem Zeitpunkt abbrechen konnte, insbesondere auch während der Belastung. Es hat jedoch kein Teilnehmer die Studie vorzeitig beendet.

2.2 Untersuchungsablauf

Jeder Teilnehmer wurde vor Beginn der Studie sportärztlich untersucht, wozu die sportärztlichen Untersuchungsbögen des Forschungsbereichs Sport- und Bewegungsmedizin des Fachbereichs Sportwissenschaft der Universität Hamburg als Dokumentvorlage dienten. Es wurde eine körperliche Untersuchung durchgeführt und eine Anamnese von bekannten Vorerkrankungen, Einnahme von Medikamenten und aktuellen Beschwerden (sofern vorhanden) erhoben. Zusätzlich wurde der aktuelle Trainingsumfang und die Trainingsintensität notiert. Ausschlusskriterien waren akute oder chronische Erkrankungen bzw. Medikamenteneinnahme, die mit einem leistungsorientierten Sport nicht vereinbar sind. Zu diesem Zeitpunkt wurden Körpergröße (auf 1cm genau), Körpergewicht (auf 0,1kg genau) und Körperfettanteil nach Parizkova (Messung der Hautfaltendicke an 10 vorgeschriebenen Stellen des Körpers) (103) gemessen.

Der Teilnehmer wurde dann über den Testablauf informiert und konnte sich unter den Testbedingungen im Schwimmkanal mit und ohne Maske nach eigenem Belieben einschwimmen, um sich an die Bedingungen im Kanal zu gewöhnen. Jeder Proband absolvierte 2 Tests im Schwimmkanal des Olympiastützpunktes Hamburg/Kiel, die an verschiedenen Tagen innerhalb einer Woche durchgeführt wurden.

Der Schwimmkanal ist an einer Seite mit einem Sichtfenster ausgerüstet. Die Wassertemperatur betrug $26 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Das Herzstück der Gegenstromanlage stellen 2 Axialpumpen mit einer Motorleistung von jeweils 75 kW dar. Die Drehzahl ist über entsprechende Frequenzwandler zwischen 17 und 50 Hz regelbar, um die Strömungsgeschwindigkeit (Bereich von 0,4 m/s bis maximal 2,4 m/s) den jeweiligen Anforderungen exakt anpassen zu können. Auf einer verschiebbaren Brücke über dem

Schwimmkanal befand sich das Oxycon-Messsystem (OXYCON GAMMA Spirometriesystem, Mijnhardt, Bunnik, Niederlande), welches je nach Schwimmposition mit dem Schwimmer verschoben wurde. Durch Konstruktion einer speziell für die Zwecke des Strömungskanals konzipierten Maske konnte der durch die Maske bedingte Wasserwiderstand dem Widerstand angeglichen werden, der durch die Drehbewegungen des Kopfes entsteht (108,111). Die Verbindung zur Mischkammer der Spirometrieinheit erfolgt über den ca. 3,0 m langen expiratorischen Schenkel eines eigens konzipierten Schlauchsystems (Totraumvolumen 2130ml), der inspiratorische nur ca. 75 cm lange Schenkel dient lediglich der Einatmung der Umgebungsluft (halboffenes System). Für das Schlauchsystem wurde ein relativ breiter Durchmesser von 3,4 cm gewählt, so dass der durch den Schlauch hervorgerufene Strömungswiderstand vernachlässigbar klein ist. Der zusätzliche Totraum, bedingt durch das Mundstück und den Ventilmechanismus zur Separation der Gase, beträgt nur 30 ml und ist damit als unbedeutend einzustufen (136).

Zu Beginn jeder Stufe wurde der Proband auf eine definierte Schwimmposition in der Mitte des Kanals vorgezogen und am Ende jeder Stufe ließ er sich selbstständig zum Ende des Kanals treiben.

Die Kanalgeschwindigkeiten waren nach Messungen der Schiffsbau-technischen Versuchsanstalt Hamburg vom 28.02.1998 geeicht. Die zuverlässigsten Messergebnisse ergaben sich über dem vorderen Querstrich in der Mitte des Kanals. Dies war die Position, an der die Schwimmer angewiesen wurden zu schwimmen. Sie konnten sich dort gut an den auf dem Boden des Schwimmkanals angebrachten Markierungslinien orientieren.

Der folgende Testablauf wurde von jedem Probanden absolviert (siehe auch Tabelle 2):

Alle Probanden begannen den Test bei einer Kanalgeschwindigkeit von 1,01 m/s und jede Belastungsstufe dauerte 3 min, wobei das Ende bzw. die Zeit bis zum Ende der Stufe durch akustische Signale angezeigt wurde. Am Ende der Belastungsstufe ließen sich die

Probanden zur hinteren Wand des Kanals treiben und setzten sich dort auf den Beckenrand, so dass Kapillarblut am Ohr entnommen werden konnte. Während der einminütigen Belastungspause wurde die Geschwindigkeit von einer Stufe zur nächsten um jeweils 0,09 m/s höher geregelt und der Proband zum Ende der Pause wieder auf die Schwimmposition in der Mitte des Kanals vorgezogen, so dass er mit Beginn der nächsten Stufe sofort mit der neu eingestellten Geschwindigkeit an der definierten Position im Schwimmkanal zu schwimmen beginnen konnte. Diese Folge von Belastungsstufen wurde bis zum Abbruch fortgeführt.

Blutlaktatkonzentrationen durch Kapillarblutentnahme am hyperämisierten Ohr wurden in Ruhe, in der Pause nach jeder Belastungsstufe und zusätzlich in der 4. und 7. Minute nach Belastungsende gemessen (siehe Tabelle 2). Blutlaktatkonzentrationen wurden mit dem EBIO (Eppendorf, EBIO 6666, Version 4.12, Hamburg, Deutschland) mit einem enzymatisch-amperometrischen Verfahren analysiert. Die Herzfrequenz wurde kontinuierlich mit einem Messgerät der Firma POLAR Electro (Tampere, Finnland) gemessen. Der Proband trug dazu einen Gurt um die Brust und eine Uhr am Arm, die die Herzfrequenz gemittelt in 5sekündigen Intervallen speicherte.

Die Schwimmart für diesen Test war Freistil (Kraul) unabhängig von der Hauptschwimmart des Probanden. Mindestens zu Beginn jeder Minute der Belastung wurde die Armfrequenz mit einer Frequenzuhr (kombinierte Stopp- und Frequenzuhr der Firma Seiko (Japan)) über 3 Zyklen gemessen und die Art des Beinschlages (2er oder 6er), die vorwiegend während des gesamten Tests geschwommen wurde, notiert. Die Messwerte der Armfrequenz wurden für die jeweilige Belastungsstufe gemittelt und auf ganze Zahlen gerundet.

Vor mindestens einem der beiden Tests, die jeder Proband absolvierte, wurde der Sauerstoffverbrauch unter Ruhebedingungen im Wasser ermittelt. Dazu musste sich der

Proband mit dem Schnorchel im Schwimmkanal bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,01 m/s an einer Leine festhalten. Er sollte sich so wenig wie möglich bewegen, aber eine Gleitposition einnehmen. Diese Position wurde für mindestens 3 Minuten beibehalten. Auf einem Testbogen (siehe Anhang 8.1) wurden außerdem die Hauptlage (Lage mit der höchsten FINA-Punktzahl) sowie Bestzeiten auf der 25m und 50m Bahn über 100m, 200m und 400m Freistil festgehalten. Aus den Angaben der Athleten wurde eine Einteilung in Sprinter, Mittel- und Langstreckler vorgenommen, je nachdem, ob die Sportler die höchste FINA-Punktzahl über 100m, 200m oder 400m Freistil erreichten. Für die Auswertung berücksichtigt wurden nur die Zeiten auf der 50m Bahn.

Während des gesamten Tests und in der Erholungsphase wurden die Atemgase (Mischkammerverfahren) kontinuierlich analysiert und die Mittelwerte in Intervallen von 10 Sekunden ausgegeben. Da die Messdaten, besonders der Atemgasanalyse, innerhalb einer Belastungsstufe erheblich schwanken, haben sich folgende Methoden der Auswertung bewährt. Für den Sauerstoffverbrauch und den respiratorischen Quotienten wird ein gleitender Durchschnittswert ('moving average') über 90 Sekunden ermittelt. Der höchste Durchschnittswert des Sauerstoffverbrauches während und bis zu 60 Sekunden nach einer Belastungsstufe wird als repräsentativ für die jeweilige Stufe angesehen.

Für die Herzfrequenz wird der höchste Messwert während oder bis zu 60 Sekunden nach Belastungsende als repräsentativ für die Belastungsstufe angesehen (siehe Tabelle 2). Alle gemessenen Daten der maximalen Herzfrequenz stammen jedoch aus der letzten Minute der Belastung oder den ersten 10 Sekunden nach der Belastung. Der theoretisch mögliche Zeitraum von bis zu 60 Sekunden nach der Belastung wurde gewählt, um nicht unterschiedliche Zeiträume für Sauerstoffverbrauch und Herzfrequenz zu wählen.

	Belastungsminute																										
	Ruhe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Belastung																											
Pause																											
Herzfrequenz																											
resp. Parameter																											
Laktat																											
Zyklusfrequenz																											
Beinschlag																											

Tabelle 2: Tabellarische Darstellung der Belastungen und Pausen einer 5stufigen Belastung mit Einordnung der Messparameter Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme, Laktat, Zyklusfrequenz und Beinschlag in den zeitlichen Ablauf.

2.3 Statistische Methoden

Die statistische Auswertung erfolgte mit den Programmen Excel Version 5.0 (Microsoft, USA) und STATISTICA für Windows, Version 5.0 (Firma StatSoft, Tulsa, USA). Die graphische Aufbereitung stützte sich auf das Programm Excel (Version 5.0; Microsoft, USA).

Für die biomathematisch-statistische Auswertung dienten die Mittelwerte der Stichprobe (\bar{x}) und die Standardabweichung (s) als Ausgangsbasis zur Überprüfung der Grundgesamtheit.

Der Kolmogoroff-Smirnoff-Test und der Test nach David, Pearson und Stephens wurden zur Prüfung auf Normalverteilung angewandt. Bei verbundenen Stichproben finden bei normalverteilten Ausgangsdaten der t-Test für verbundene Stichproben Anwendung, während unverbundene Stichproben bei Normalverteilung mittels des t-Tests für unverbundene Stichproben, bei nicht normalverteilten Grundgesamtheiten mittels des U-Tests nach Wilcoxon, Mann und Whitney evaluiert wurden. Bei mehr als 2 Gruppen wird

die Varianzanalyse (ANOVA, MANOVA) mit der post hoc Prüfung durch den Scheffè-Test bzw. Turkeys-Test angewendet.

Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde ein Niveau von Alpha = 5% ($p < 0,05$) festgesetzt. Folgende Schranken und Symbole wurden bei der Beurteilung der Ergebnisse der statistischen Prüfverfahren verwandt:

+ $p > 0,05$ = Irrtumswahrscheinlichkeit alpha > 5% nicht signifikant

* $p < 0,05$ = Irrtumswahrscheinlichkeit alpha < 5% signifikant

** $p < 0,01$ = Irrtumswahrscheinlichkeit alpha < 1% sehr signifikant

*** $p < 0,001$ = Irrtumswahrscheinlichkeit alpha < 0,1% hochsignifikant

2.4 Kritik der Methoden

Folgende methodische Probleme können die Untersuchungsergebnisse beeinflussen:

Das Schwimmen mit dem Schnorchel entspricht nicht in jeder Hinsicht dem Schwimmen ohne Schnorchel, da der Kopf und eventuell auch der Körper nicht so stark gedreht wird wie beim freien Schwimmen und der Wasserwiderstand durch die Maske theoretisch zunehmen kann. Auch wird die Atmung durch das Atmen mit Schnorchel erschwert und es dringt manchmal Wasser in den Schnorchel ein, was subjektiv oft als störend empfunden wird. Diese Probleme nehmen jedoch mit zunehmender Gewöhnung an die Testsituation ab, weshalb den Sportlern vor Beginn der Belastung die Möglichkeit gegeben wird, sich an die Testbedingungen zu gewöhnen. Die Technik selbst wird subjektiv als unverändert zum freien Schwimmen empfunden. Toussaint konnte zeigen, dass beim Gebrauch einer Maske, die der in dieser Studie benutzten Maske sehr ähnlich ist, der Wasserwiderstand dem ohne Maske entspricht (136,142). Schmidt (124) zeigte in seinen Versuchen mit gleichen

Untersuchungsbedingungen (Kanal, Maske, Belastungen) und ähnlichem oder sich überlappendem Probandengut, dass die Unterschiede zwischen Schwimmen mit und ohne Maske nicht signifikant sind.

Schwierig zu beurteilen ist, ob die Geschwindigkeit an allen Stellen des Kanals zu allen Zeitpunkten genau den angezeigten Werten entspricht. Neuste Eichmessungen von Technikern des Landesschiffahrtsamtes Hamburg zeigen jedoch, dass die Geschwindigkeiten an den Punkten, an denen die Schwimmer angewiesen wurden zu schwimmen, konstant sind und denen der Anzeige entsprechen. Daher war es von entscheidender Bedeutung, dass die Probanden ihre Position im Schwimmkanal genau einhielten. Die Messungen wurden an verschiedenen Punkten im Schwimmkanal in verschiedenen Wassertiefen bei Geschwindigkeiten zwischen 0,5 und 2,3 m/s durchgeführt. Erst bei Geschwindigkeiten über 1,8 m/s weichen die angezeigten von den gemessenen Werten durch Wellenbildung stärker ab. Diese Geschwindigkeiten werden aber in der Spiroergometrie nicht erreicht, sondern sind nur für das Schnelligkeitstraining bedeutsam.

Bei sehr hohen Geschwindigkeiten (ab 1,8 m/s) bilden sich Wellen im Kanal und die Strömungsverhältnisse sind nicht mehr laminar. Das führt dazu, dass die Position im Kanal umso genauer eingehalten werden muss, um vergleichbare Daten zu erhalten. Lamellen hinter den Turbinen sorgen dafür, dass eine weitgehend laminare Strömung erzeugt wird. Besonders in den beckenrand-nahen Bereichen sind die Strömungsverhältnisse bei diesen Geschwindigkeit nicht mehr laminar, so dass auch aus diesem Grund eine Position in der Mitte des Schwimmkanals eingehalten werden sollte.

Insgesamt muss aber betont werden, dass die Gegenstromanlage in Hamburg eine der modernsten Ihrer Art weltweit darstellt. Durch den Einbau von Lamellen wird ein höchstes Maß an linearer Strömung erzeugt.

Zusätzlich muss man erwähnen, dass die im Kanal geschwommenen Geschwindigkeiten nicht direkt auf Geschwindigkeiten im Becken umzurechnen sind. Man muss hier mindestens einen Ausgleichsfaktor für Start und Wenden einsetzen oder sich an den reinen Schwimgeschwindigkeiten im Becken orientieren. Wenn man z.B. 100m in 60 Sekunden zurücklegt, entspricht dies einer Geschwindigkeit von 1,67 m/s. Die ersten 10m inklusive des Startsprunges können aber in 4 Sekunden zurückgelegt werden, so dass für die restlichen 90m noch 56 Sekunden 'übrig' bleiben. Dies entspricht dann nur noch einer reinen Schwimgeschwindigkeit von 1,61 m/s.

Natürlich ist auch der Belastungsverlauf etwas anders als im Becken, denn dort wird immer mit einer relativ hohen Geschwindigkeit begonnen, die dann mehr oder weniger stetig abfällt. Für die Beurteilung von physiologischen Parametern ist es jedoch eher von Vorteil, wenn der Schwimmer eine konstante Geschwindigkeit beibehält anstatt mit einer höheren Geschwindigkeit zu beginnen und dann langsamer zu werden. Es entsteht eine verbesserte Vergleichbarkeit im Sinne einer Standardisierung und die gemessenen Parameter können wirklich einer einzigen Schwimgeschwindigkeit zugeordnet werden, anstatt einem Geschwindigkeitsbereich, der bei einem Wettkampf oder auch Stufentest im Becken durchlaufen wird. Diese Standardisierung ist ein großer Vorteil des Schwimmkanals, denn bei Stufentests im Becken treten immer Ungenauigkeiten auf, weil Sportler sehr schnell anfangen und dann langsamer werden, Abschnitte innerhalb der Belastung langsamer oder schneller schwimmen oder zum Ende der Belastung einen „Endspurt“ einlegen, bzw. sich austreiben lassen, um eine genau vorgegebene Zeit zu erreichen. Diese Geschwindigkeitsveränderungen im Becken verändern natürlich die gemessenen Laktatwerte, können aber in einer Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Nicht alle Schwimmer erreichten eine volle Ausbelastung im durchgeführten Stufentest, da dies nicht gefordert und für die zu klärende Fragestellung nicht von Bedeutung war. Für

die Versuchsanordnung waren die submaximalen Belastungsstufen zur Auswertung völlig ausreichend und nur vollständig geschwommene Belastungsstufen wurden bei der Berechnung berücksichtigt.

3. Ergebnisse

3.1 Messdaten

3.1.1 Sauerstoffverbrauch in Ruhe pro kg (LBM)

Die 23 getesteten Probanden hatten einen basalen Sauerstoffverbrauch von $419,9 \pm 105,2$ ml bei einer fettfreien Körpermasse (lean body mass, LBM) von $53,6 \pm 9,9$ kg. Gemessen wurde der Sauerstoffverbrauch über einen Zeitraum von 3 Minuten, während der die Probanden in Strecklage möglichst bewegungslos an einer Leine bei einer Kanalgeschwindigkeit von 1,01 m/s im Schwimmkanal liegen mussten.

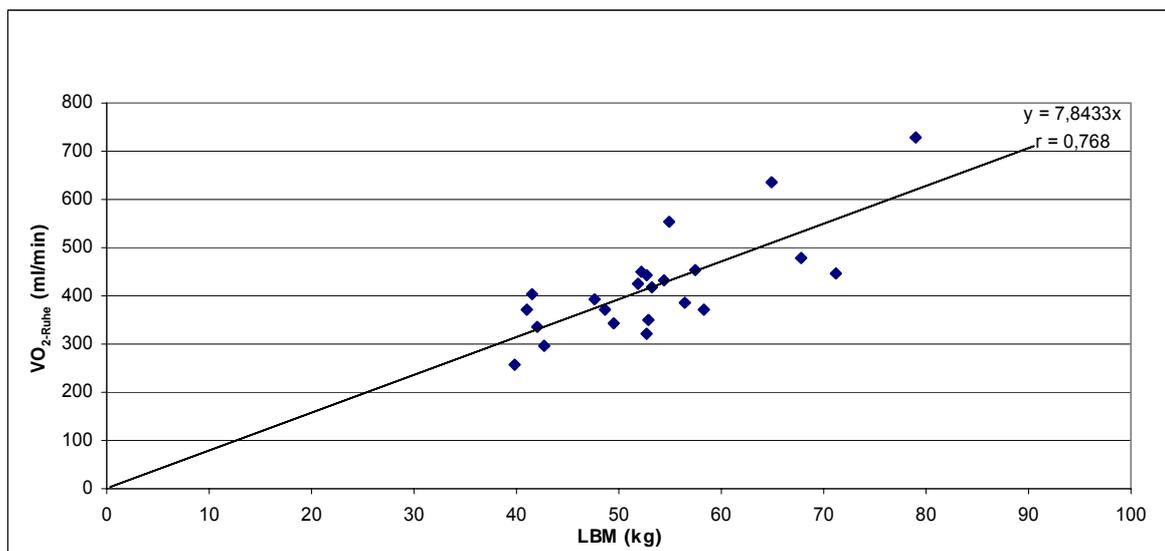


Abbildung 1: Verhältnis von basalem Sauerstoffverbrauch in ml/min in Abhängigkeit von der fettfreien Körpermasse (LBM) in kg ($p < 0,001$).

Die Ausgleichsgerade dieser gemessenen Werte hat die Form $f(x) = 7,84 \cdot x$ ($r = 0,768$; $p < 0,001$). Der Faktor 7,84 hat die Dimension $\text{ml O}_2 / (\text{min} \cdot \text{LBM}(\text{kg}))$.

Das Verhältnis der basalen Sauerstoffaufnahme zum 'tatsächlichen' Körpergewicht hat einen geringeren Korrelationskoeffizienten ($r = 0,737$; $p < 0,001$), so dass wir uns entschieden haben, den basalen Sauerstoffverbrauch 'pro LBM' ($\text{ml}/(\text{min} \cdot \text{kg}(\text{LBM}))$) anzugeben und auch den Netto-Sauerstoffverbrauch mit Hilfe der fettfreien Körpermasse (LBM) zu ermitteln.

Mit Hilfe dieser Ausgleichsgeraden wird im weiteren Verlauf jeder Person ein basaler Sauerstoffverbrauch im Wasser zugeordnet, da die individuellen Werte auch innerhalb der 3 Minuten noch stark schwanken. Der idealisierte basale Sauerstoffverbrauch (ml/min) unter Ruhebedingungen im Wasser entspricht also der fettfreien Körpermasse (LBM) in kg multipliziert mit 7,84.

3.1.2 Netto-Sauerstoffverbrauch

Der Netto-Sauerstoffverbrauch ergibt sich aus der Differenz zwischen aktuellem Sauerstoffverbrauch auf einer Belastungsstufe und dem idealisierten Ruheverbrauch:

$$VO_{2\text{Netto}} = VO_{2\text{Brutto}} - (7,84 * \text{LBM})$$

Für die Berechnung von Wirkungsgraden wird nur der Netto-Sauerstoffverbrauch verwendet (57,116). Der Netto-Verbrauch beschreibt dann nämlich die Energie, die für eine Belastung zusätzlich benötigt wird, so dass eine Proportionalität für beide Größen abgeleitet werden kann.

3.1.3 Netto-Leistung bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Der Netto-Sauerstoffverbrauch wird mit Hilfe des kalorischen Äquivalents in Netto-Leistung umgerechnet: $P_{\text{net}} = (4,940 * RQ + 16,040) * VO_{2\text{-netto}} / 60$ (7,11,141,142). Diese Umrechnung ist streng genommen nur unter rein aeroben Stoffwechselbedingungen gültig. Um auch den anaeroben Anteil der Leistung zu berücksichtigen, wird wie folgt vorgegangen. Bei Laktatwerten von 2,0 mmol/l oder weniger am Ende einer Stufe wird die zusätzliche Energiemenge als vernachlässigbar klein angesehen. Steigt der Laktatwert auf über 2,0 mmol/l an, wird die Netto-Zunahme des Laktatwertes als Differenz von gemessenem Wert und Ruhewert berechnet. 1 mmol/l Laktat entspricht dann 3 ml O₂/kg (Körpergewicht) bzw. 60 J/kg (11,114,116). Verschiedene Autoren haben Werte zwischen 2,7 und 3,3 ml O₂/kg (Körpergewicht) im Laufen, Schwimmen und Radfahren als Energieäquivalent ermittelt (12,13,47,86,113). Di Prampero schlug in einem ausführlichen Review (114) vor den Wert von 3 ml O₂/kg (Körpergewicht) zu verwenden, da er mit allen veröffentlichten Ergebnissen kompatibel ist. Eine der angewendeten Methoden (47) zur Ermittlung des Energieäquivalentes ersetzte z.B. kurzfristig bei maximalen Belastungen in der eingeatmeten Luft Sauerstoff durch ein anderes Gas und beobachtete die resultierende Veränderung des Blutlaktatspiegels.

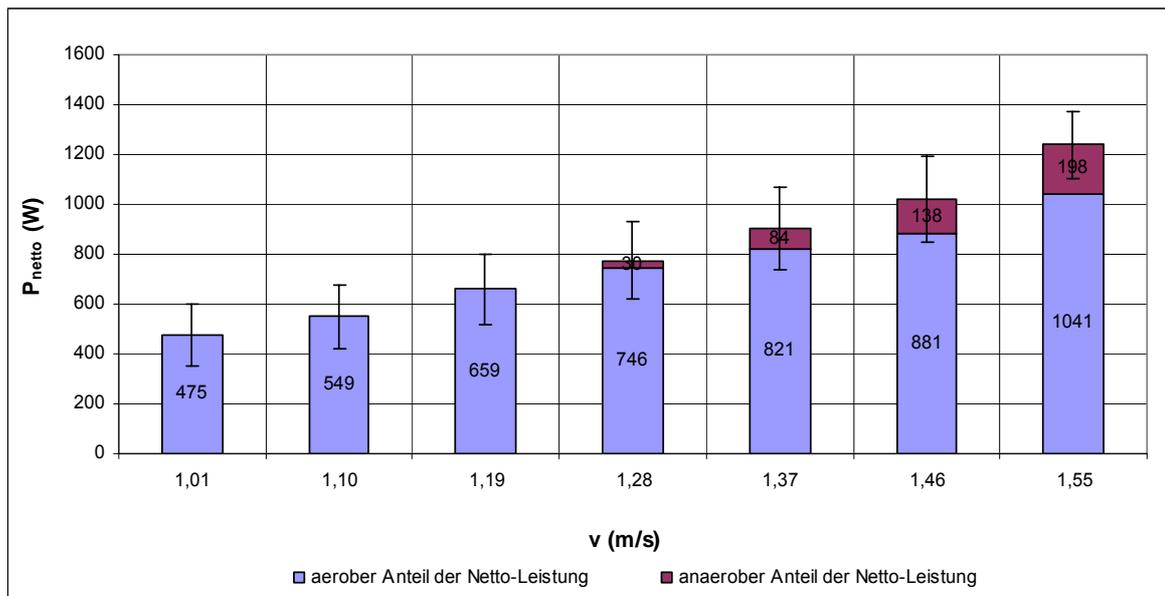


Abbildung 2: Mittelwerte der berechneten Netto-Leistungen getrennt nach aerobem und anaerobem Anteil bei den verschiedenen Geschwindigkeitsstufen.

Die Netto-Leistung steigt mit steigender Geschwindigkeit an. Der Anstieg ist jedoch nicht linear. Auf die genaue Form der Kurve wird in folgenden Kapiteln detailliert eingegangen.

3.1.4 Herzfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Für die Berechnung der dargestellten Werte wurde jeweils die höchste Herzfrequenz einer Belastungsstufe, während der Belastung oder in der Pause danach, verwendet. Gewöhnlich trat diese höchste Herzfrequenz in den letzten 30 Sekunden der Belastung auf.

Es kam zu einem linearen Anstieg der gemittelten Herzfrequenzen (siehe Abbildung 3) mit steigender Belastung bis zu einer Geschwindigkeit von 1,37 m/s ($HF = 107 \cdot v + 18$; $r = 0,998$; $p < 0,001$). Bei höheren Geschwindigkeiten flacht die Kurve ab, weil nicht mehr alle Probanden diese Geschwindigkeitsstufen erreichen.

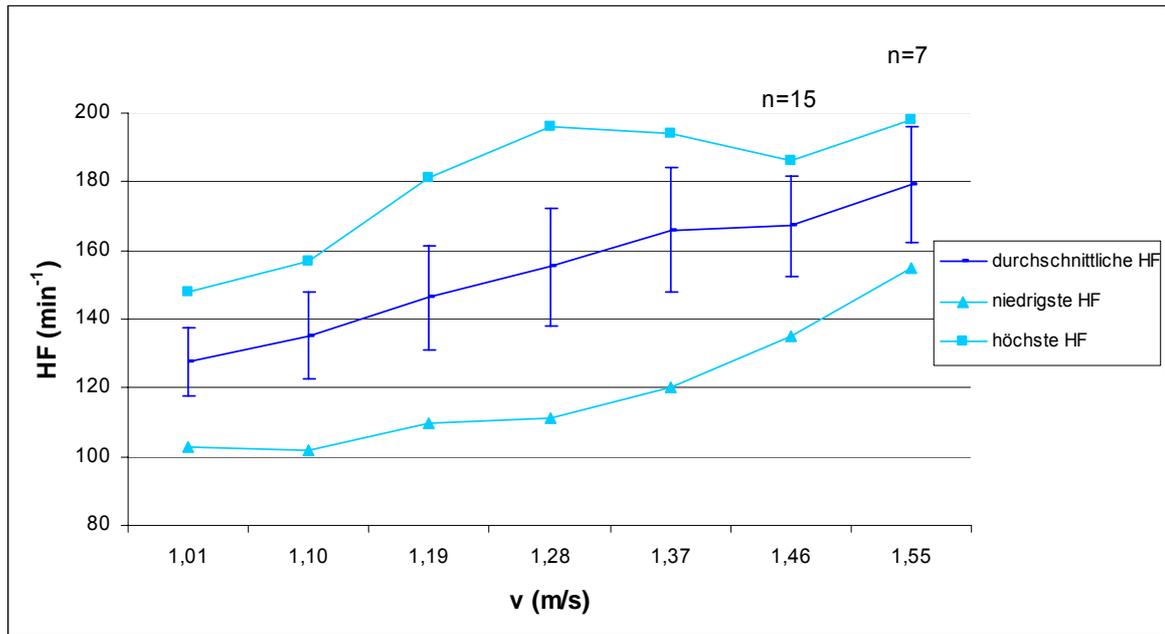


Abbildung 3: Durschnittliche, niedrigste und höchste gemessene Herzfrequenz bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen.

3.1.5 Blutlaktatwerte bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Im 2. Test wurden zum Ende der Belastung nicht ganz so hohe Laktatwerte erreicht wie im 1. Test. Die Erholung erfolgt im 2. Test außerdem langsamer (siehe Abbildung 4).

Die Unterschiede zwischen erstem und zweitem Test sind sehr gering und nicht signifikant ($p > 0,05$) (siehe Tabelle 3). In keinem Einzelfall ist der Laktatwert in der 7. Minute höher als in der 4. Minute nach Belastung.

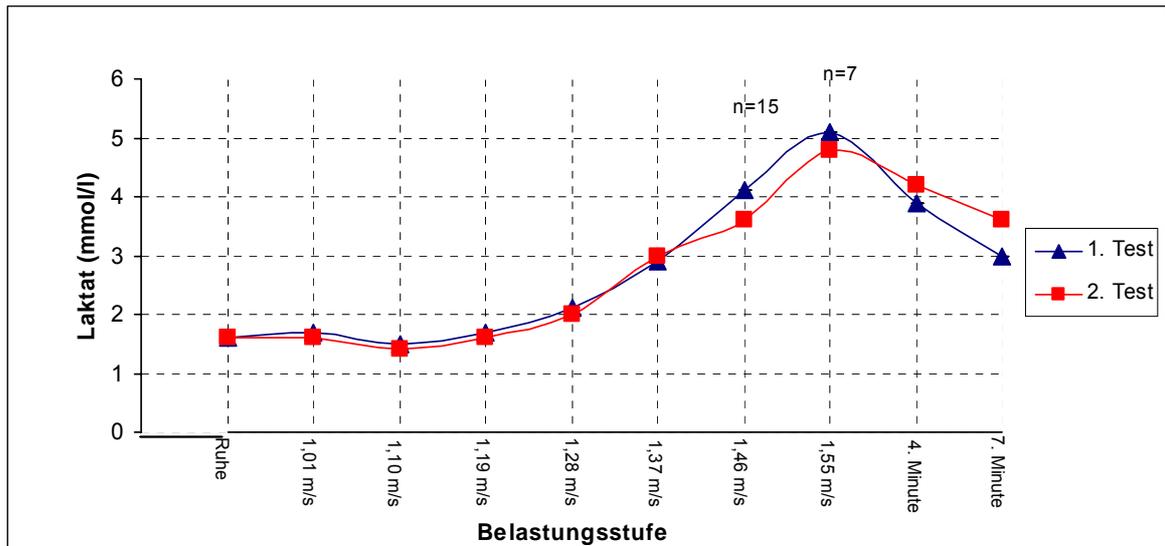


Abbildung 4: Graphische Darstellung der gemittelten Laktatwerte im ersten und zweiten Test.

Belastungsstufe	1. Test Laktatwerte (mmol)	SD	2. Test Laktatwerte (mmol)	SD	gemittelte Laktatwerte beider Tests (mmol)	SD
Ruhe	1,6	1,8	1,6	0,9	1,6	1,4
1,01 m/s	1,7	1,3	1,6	0,6	1,6	0,8
1,10 m/s	1,5	1,1	1,4	0,5	1,4	0,9
1,19 m/s	1,7	1,0	1,6	0,8	1,6	1,1
1,28 m/s	2,1	1,1	2,0	1,0	2,1	1,1
1,37 m/s	2,9	1,4	3,0	1,7	3,0	1,5
1,46 m/s	4,1	1,9	3,6	2,4	3,9	2,1
1,55 m/s	5,1	2,2	4,8	1,1	4,9	1,6
4. Minute	3,9	1,6	4,2	1,5	4,1	1,6
7. Minute	3,0	1,5	3,6	1,5	3,3	1,5

Tabelle 3: Gemittelte Blutlaktatwerte in mmol/l aller Testpersonen bei den verschiedenen Geschwindigkeiten jeweils mit den dazugehörigen Standardabweichungen.

3.1.6 Zyklusfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Die Zyklusfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Unterschiede zwischen erstem und zweiten Test sind in keinem Fall signifikant ($p > 0,05$).

Belastungsstufe	1. Test Zyklusfrequenzen (min ⁻¹)	StAbw	2. Test Zyklusfrequenzen (min ⁻¹)	StAbw	gemittelte Zyklusfrequenzen beider Tests (min ⁻¹)	StAbw
1,01 m/s	28 (n=23)	3,0	27 (n=23)	3,0	28 (n=46)	2,6
1,10 m/s	29 (n=23)	3,2	29 (n=23)	3,3	29 (n=46)	3,0
1,19 m/s	32 (n=23)	3,5	31 (n=23)	3,2	31 (n=46)	3,4
1,28 m/s	33 (n=23)	3,3	33 (n=23)	3,4	33 (n=46)	3,2
1,37 m/s	35 (n=23)	3,8	35 (n=22)	3,8	35 (n=45)	3,7
1,46 m/s	37 (n=16)	4,0	36 (n=11)	4,1	37 (n=27)	3,9
1,55 m/s	40 (n=6)	4,3	39 (n=6)	4,4	40 (n=12)	4,0

Tabelle 4: Zyklusfrequenzen im 1. und 2. Test bei den verschiedenen Geschwindigkeitsstufen.

Die Zyklusfrequenzen können auch als Zuglänge ausgedrückt werden, da die Geschwindigkeit in m/min dividiert durch die Zyklusfrequenz die Zykluslänge in m/Zyklus ergibt (Zykluslänge = v (m/s) * 60 / Zyklusfrequenz) (siehe Tabelle 5).

Belastungsstufe	1. Test Zuglänge (m/Zyklus)	StAbw	2. Test Zuglänge (m/Zyklus)	StAbw	gemittelte Zuglängen beider Tests (m/Zyklus)	StAbw
1,01 m/s	2,16	3,0	2,24	3,0	2,16	2,6
1,10 m/s	2,28	3,2	2,28	3,3	2,28	3,0
1,19 m/s	2,23	3,5	2,30	3,2	2,30	3,4
1,28 m/s	2,33	3,3	2,33	3,4	2,33	3,2
1,37 m/s	2,35	3,8	2,35	3,8	2,35	3,7
1,46 m/s	2,37	4,0	2,43	4,1	2,37	3,9
1,55 m/s	2,33	4,3	2,38	4,4	2,33	4,0

Tabelle 5: Zuglängen im 1. und 2. Test bei den verschiedenen Geschwindigkeitsstufen.

Nicht alle Probanden haben die höheren Geschwindigkeitsstufen erreicht, so dass sich der Durchschnitt auf den höheren Stufen nicht mehr auf alle Probanden bezieht.

Die Zyklusfrequenz steigt mit steigender Geschwindigkeit von 28 Zyklen pro Minute bei 1,01 m/s kontinuierlich auf 40 Zyklen pro Minute bei 1,55 m/s an. Auch die Zuglänge steigt in geringerem Maße bis zu einer Geschwindigkeit von 1,46 m/s auf 2,37 Meter pro Zyklus an und fällt bei der höchsten Geschwindigkeit wieder etwas ab (2,33 Meter pro Zyklus), wobei hierbei wiederum zu berücksichtigen ist, dass nur die leistungsstärksten Probanden diese Geschwindigkeitsstufen erreichten.

3.1.7 Zyklusfrequenzen getrennt nach Leistungsgruppen

Die Bestzeiten der Schwimmer über 200m Freistil auf der 50m Bahn wurden mit Hilfe der FINA-Tabelle (Stand 01.01.1998) in Punkte umgerechnet. Die 200m Freistil wurden als Bezugsgröße gewählt, da auf dieser Strecke sowohl das aerobe als auch das anaerobe System der Energiebereitstellung zu etwa gleichen Anteilen genutzt werden, denn bei ca. 2 Minuten Belastung werden die genannten Systeme jeweils zu ca. 50% beansprucht (147). Auf diese Weise ist ein Vergleich zwischen Sprintern und Langstrecklern unter möglichst einheitlichen Bedingungen möglich.

Nur der Unterschied auf der höchsten Geschwindigkeitsstufe (1,55 m/s) zwischen der stärksten und der schwächsten Gruppe ist signifikant ($p < 0,05$) (siehe Tabelle 6). In der schwächsten Leistungsgruppe erreichte jedoch nur noch ein Athlet diese Geschwindigkeit. Alle anderen Unterschiede sind nicht signifikant für die getesteten Gruppen.

Geschwindigkeit (m/s)	Leistungsklassen nach FINA Tabelle					
	über 800 Punkte (n=4)		600-800 Punkte (n=13)		weniger als 600 Punkte (n=6)	
	Zyklusfrequenz (min ⁻¹)	Zuglänge (m/Zyklus)	Zyklusfrequenz (min ⁻¹)	Zuglänge (m/Zyklus)	Zyklusfrequenz (min ⁻¹)	Zuglänge (m/Zyklus)
1,01	27	2,24	28	2,16	28	2,16
1,10	28	2,36	29	2,28	30	2,20
1,19	31	2,30	31	2,30	33	2,16
1,28	32	2,40	33	2,33	35	2,19
1,37	33	2,49	35	2,35	37	2,22
1,46	36	2,43	37	2,37 (n=8)	37	2,37 (n=2)
1,55	38*	2,45	39	2,38 (n=1)	48*	1,94 (n=1)

Tabelle 6: Zyklusfrequenzen und Zuglängen bei allen Geschwindigkeiten getrennt nach Leistungsgruppen ($p < 0,05$; nur mit * gekennzeichnete Messwerte $p < 0,05$).

3.1.8 Graphischer Vergleich von Änderungen der Leistung, Herzfrequenz, Zyklusfrequenz und Laktat mit der Geschwindigkeit

Alle Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r) liegen zwischen 0,992 und 0,998 ($p < 0,001$). Die Leistung ändert sich entsprechend einer Potenzfunktion ($P = A \cdot v^{b+1}$), Herzfrequenz und Zyklusfrequenz ändern sich gemäß einer linearen Funktion und das Laktat ändert sich entsprechend einer Exponentialfunktion ($\text{Laktat} = a \cdot e^{b \cdot v}$) (siehe Abbildung 5). Die Leistung ist eine aus Sauerstoffaufnahme und Blutlaktatkonzentrationen berechnete Größe, während alle anderen Parameter direkt gemessen wurden.

Die größte Steigung bei steigenden Geschwindigkeiten weist die Laktatkurve auf, denn sie beschreibt nur die anaerob erzeugte Energiemenge und diese steigt bei höheren Geschwindigkeiten überproportional stark an.

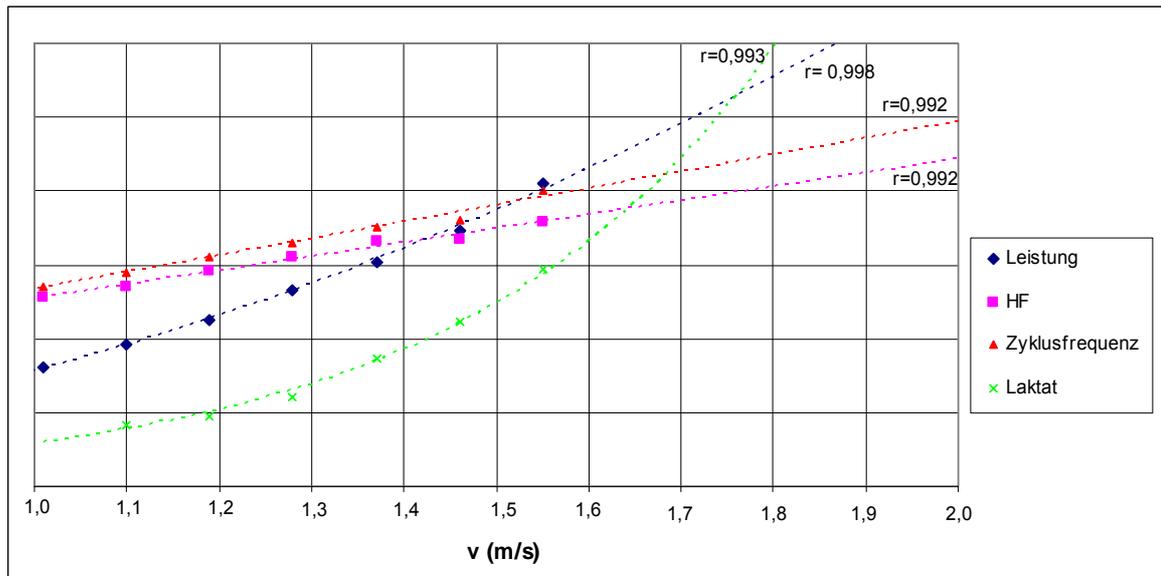


Abbildung 5: Verlauf von Leistung, Herzfrequenz, Zyklusfrequenz und Laktat mit der Geschwindigkeit.

3.1.9 Vergleich der Messgrößen “Leistungsabgabe“ und “Laktat“ am Beispiel

Das Ruhelaktat betrug im ersten Test 1,0 mmol/l und im zweiten Test 1,2 mmol/l. Die Projektion für einen maximalen Laktatwert von 15 mmol/l würde im ersten Test eine maximale Geschwindigkeit von 1,82 m/s ($r = 0,96$, $p < 0,001$) und im zweiten Test eine maximale Geschwindigkeit von 1,76 m/s ($r = 0,95$, $p < 0,001$) ergeben (siehe Abbildung 6).

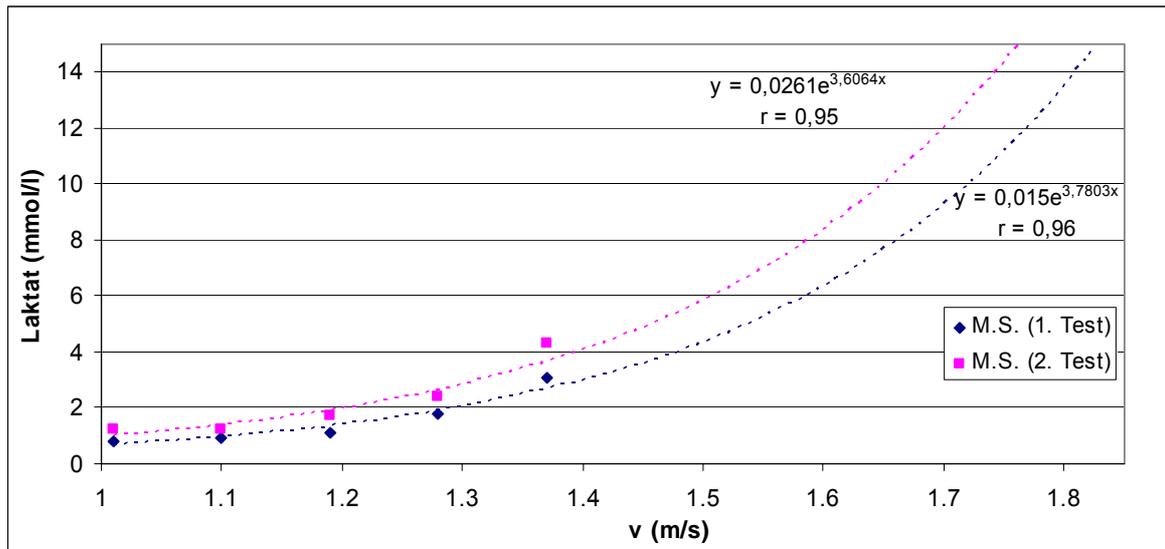


Abbildung 6: Laktatwerte und mathematisches Modell des Laktatverlaufes für eine Schwimmerin.

Die Abbildung 7 zeigt, wie viel Energie die Schwimmerin wirklich für die geschwommenen Geschwindigkeiten aufgewendet hat. Erst jetzt wird deutlich, dass der Energieverbrauch in beiden Tests sehr ähnlich war und für eine projizierte Geschwindigkeit von 1,76 m/s bzw. 1,82 m/s würden sich für beide Tests eine theoretisch nötige Leistung von etwa 1744 W ($r = 0,99$, $p < 0,001$) bzw. 1885 W ($r = 0,99$, $p < 0,001$) ergeben. Die Ergebnisse der ermittelten mathematischen Funktion sind jeweils hochsignifikant im Vergleich zu den gemessenen Ausgangswerten.

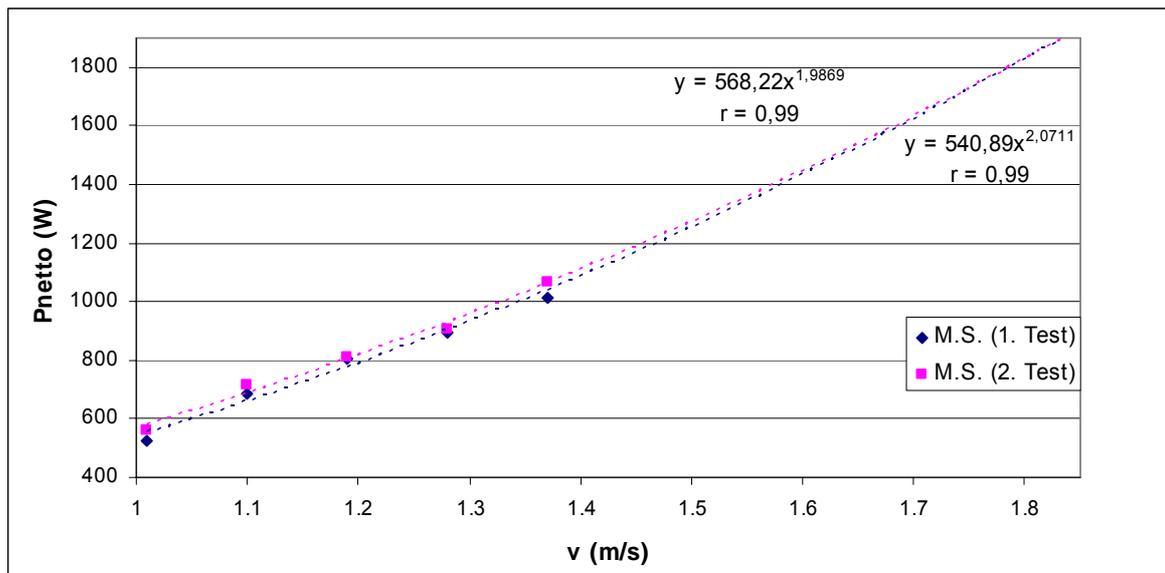


Abbildung 7: Netto-Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für die gleiche Schwimmerin wie in Abbildung 6 ($p < 0,001$).

3.2 Mathematische Modelle der Leistungsabgabe

3.2.1 Individueller Verlauf der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit

Wie unter 3.1.3 beschrieben wird mit dem Netto-Sauerstoffverbrauch (unter Berücksichtigung des kalorischen Äquivalents) und dem gebildeten Laktat die Netto-Leistung berechnet (7,11,141,142).

Bei den einzelnen Geschwindigkeiten zeigen die Individuen eine unterschiedliche Leistungsabgabe, man sollte jedoch beachten, dass die Unterschiede nicht immer gleich oder proportional sind, sondern sich individuell verändern (siehe Abbildung 8).

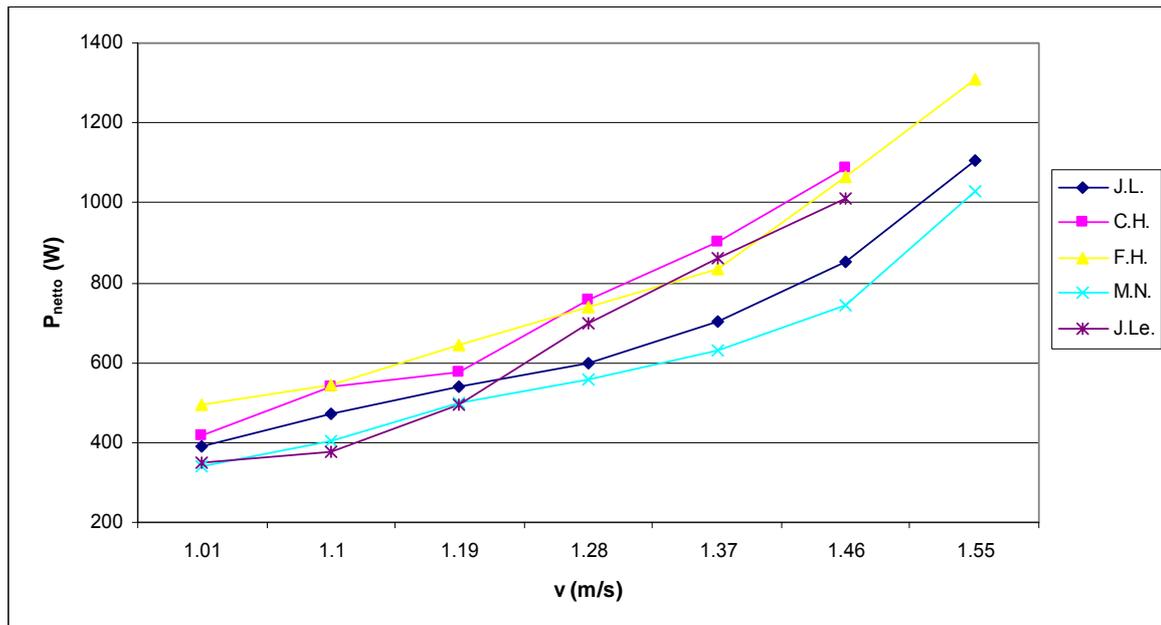


Abbildung 8: Netto-Leistung von 5 Sportlern in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

3.2.2 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit

Wenn man die Messwerte aller Testpersonen mittelt und dann an die Funktion mit der Gleichung $y = 452,39x^{2,21}$ anpasst, ergibt sich ein Korrelationskoeffizient r von 0,998 ($p < 0,001$) (siehe Abbildung 9). Der Mittelwert der Korrelationskoeffizienten aller individuell angepassten Funktionen beträgt $r = 0,985$.

Das mathematische Modell hat also die Form $P = A \cdot v^{b+1}$. Der Exponent von 'b+1' wurde gewählt, da in der Literatur bereits eine Funktion der Form $F = A \cdot v^b$ bekannt ist (20,73), die den aktiven Wasserwiderstand beschreibt. Da die Leistung das Produkt von Kraft zur Überwindung des Wasserwiderstandes multipliziert mit der Geschwindigkeit ($P = F \cdot v$) ist, wird die mathematische Formel zur Beschreibung der abgegebenen Leistung mit $P = A \cdot v^{b+1}$

gewählt. 'A' wird dabei als konstanter Widerstandsfaktor bezeichnet, der zumindest zu einem großen Teil von den Dimensionen (Höhe, Breite, Länge) des Objektes abhängt (20,73). Der Faktor "b" beschreibt dagegen, wie sich der Widerstand mit steigender Geschwindigkeit verändert.

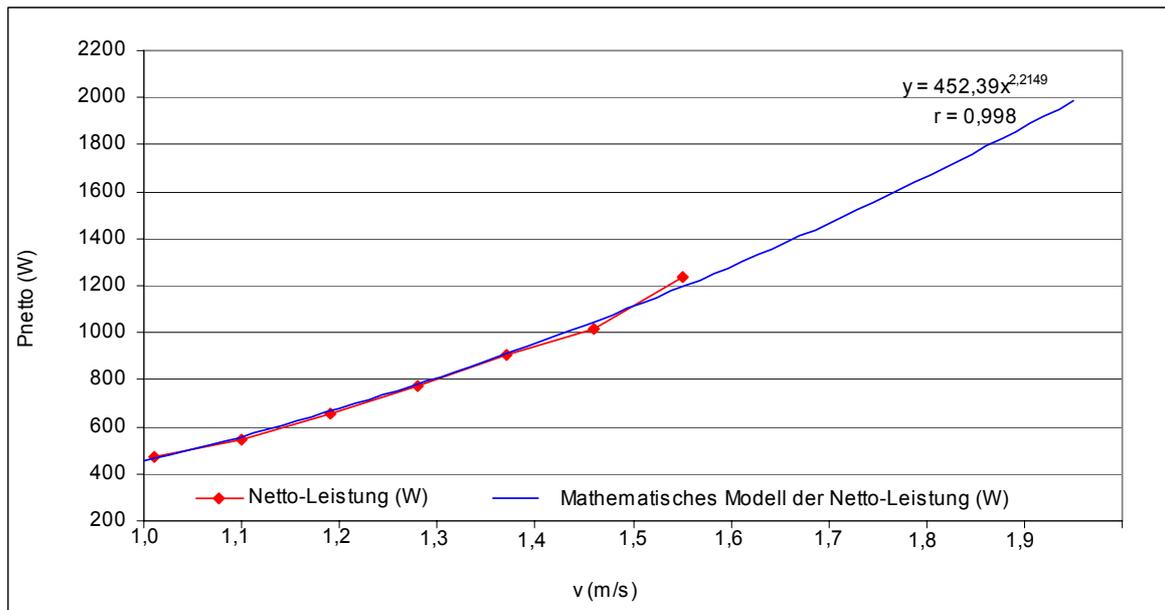


Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung der Mittelwerte der gemessenen Netto-Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und das mathematische Modell (Potenz-Funktion) ($p < 0,001$).

Im folgenden Text wird der individuelle Verlauf der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit durch diese Formel beschrieben, bzw. dazu übergegangen, zur Beschreibung nur die Faktoren 'A' und 'b' anzugeben (siehe Abbildung 10).

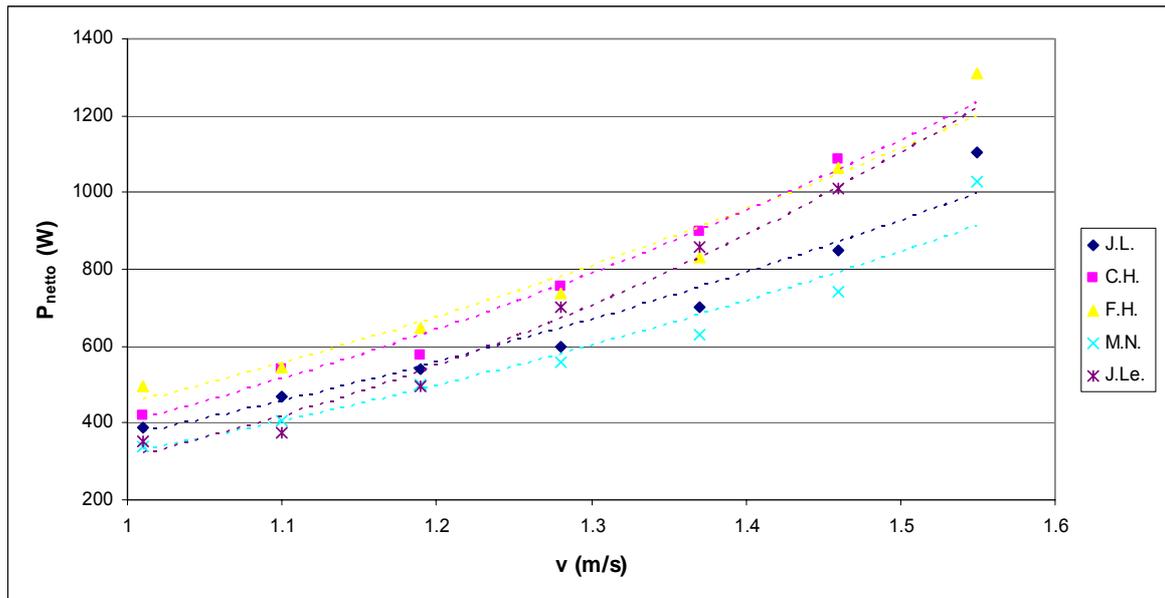


Abbildung 10: Netto-Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und die entsprechenden mathematischen Modelle der gleichen Individuen wie in Abbildung 5 ($p < 0,001$).

3.2.3 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe in Relation zur LBM ('lean body mass')

Um unterschiedliche Individuen vergleichen zu können, ist es üblich, die Netto-Leistung in Relation zur der am Stoffwechsel beteiligten Zellmasse der Sportler zu setzen, da größere und schwerere Individuen bekanntermaßen auch höhere absolute Leistungen im physikalischen Sinne erbringen können, da sie mehr stoffwechselaktives Gewebe haben. Als Annäherung für dieses stoffwechselaktive Gewebe wird oft das Körpergewicht oder die fettfreie Körpermasse verwendet (57,77,95).

Die höchste Kovarianz ergibt sich zwischen dem Faktor 'A' und dem fettfreien Körpergewicht (lean body mass, LBM) (siehe Tabelle 7). Aus diesem Grunde wurde in der

vorliegenden Studie als Korrekturfaktor für das stoffwechselaktive Gewebe der Individuen das fettfreie Körpergewicht (lean body mass, LBM) gewählt.

	Körpergröße	Körperfettanteil	Körperoberfläche	LBM	Körpergewicht
Faktor 'A'	0,47 *	-0,48 *	0,49 *	0,55 *	0,48 *

Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten der Kovarianzen aller 'Größenmerkmale' mit dem Faktor 'A' ($p < 0,05$).

In Abb. 10 und in Abb. 11 sind die gleichen Individuen abgebildet. Die Kurven haben sich im Ordinatenabschnitt zueinander leicht verschoben, die Form der Kurven (also die Steigungen) ist jedoch gleich geblieben (siehe Abbildung 11).

In der Funktion $P=A*v^{b+1}$ verändert sich durch den Bezug auf die LBM also nur der Faktor 'A', während der Faktor 'b+1' gleich bleibt (siehe Tabelle 8).

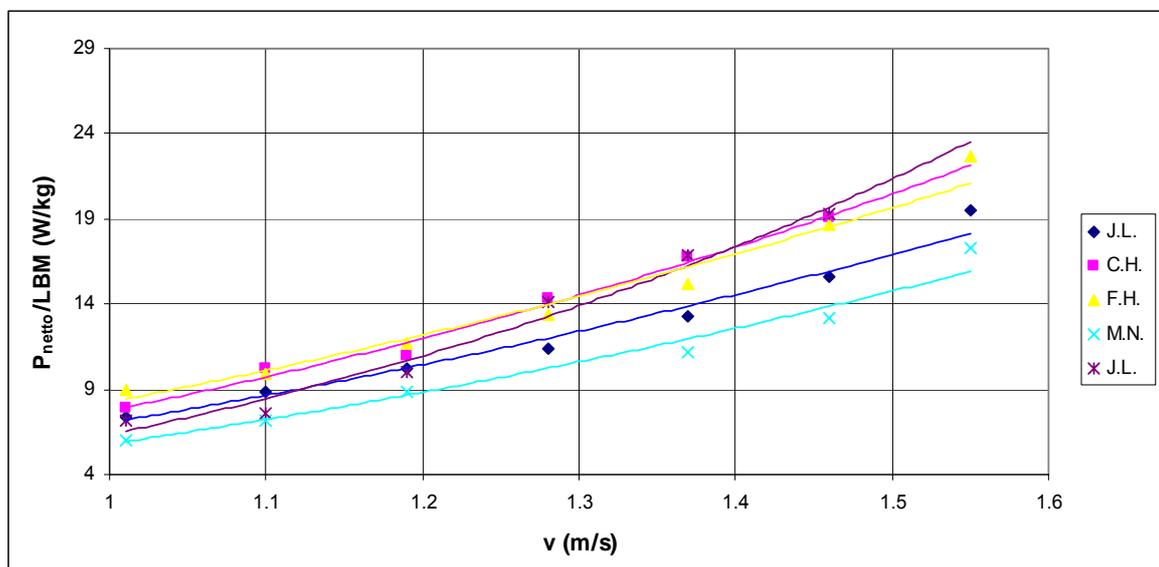


Abbildung 11: Netto-Leistung bezogen auf die LBM in kg für verschiedene Sportler und die zugehörigen mathematischen Modelle der Form $P=A*v^{b+1}$ ($p < 0,001$).

	J.L.	C.H.	F.H.	M.N.	J.Le.
Absolute Leistung					
Faktor 'A'	367	403	448	323	309
Faktor 'b+1'	2,28	2,55	2,24	2,38	3,13
Leistung pro LBM					
Faktor 'A/LBM'	6,92	7,60	8,15	5,77	6,31
Faktor 'b+1'	2,28	2,55	2,24	2,38	3,13

Tabelle 8: Tabelle 8 zeigt die Faktoren 'A' und 'b+1' der Potenzfunktionen gemäß $P=A*v^{b+1}$ ohne und mit Korrektur durch die LBM.

3.2.4 Individuelle Faktoren 'A_{LBM}' und 'b+1' des mathematischen Modells

Die individuellen Faktoren 'A_{LBM}' (definiert als A/LBM (kg)) reichen von 5,10 bis 13,42 und die Faktoren 'b+1' von 1,40 bis 3,19. Bei einem Durchschnitt von 8,45 bzw. 2,34 (siehe Tabelle 9). Grundsätzlich korrelieren kleinere Werte mit höheren Wettkampfgeschwindigkeiten. Werte für 'A_{LBM}' von kleiner als 8,45 bzw. Werte für 'b+1' von kleiner also 2,34 sind also besser als der Gruppendurchschnitt zu bewerten. Spätere Überlegungen sollen aber zeigen, dass nur die Kombination beider Werte ein sinnvolles Beurteilungskriterium darstellt.

Sportler	1. Test		2. Test	
	A_{LBM}	$b+1$	A_{LBM}	$b+1$
1	6,92	2,28	7,01	2,26
2	7,60	2,55	6,94	2,37
3	8,15	2,24	8,73	1,87
4	5,77	2,38	5,10	2,88
5	9,86	2,29	9,34	2,74
6	6,31	3,13	7,21	2,91
7	9,33	2,07	9,80	1,95
8	11,85	2,09	10,49	2,89
9	8,43	2,93	8,78	3,19
10	9,31	2,15	8,71	2,35
11	13,10	2,10	13,42	1,85
12	6,34	2,85	6,76	2,59
13	7,15	2,53	9,34	2,31
14	9,96	1,40	8,82	1,82
15	6,22	2,28	5,70	2,46
16	6,97	2,49	6,76	2,73
17	7,24	1,85	6,91	1,82
18	10,14	2,09	10,70	1,67
19	7,21	2,54	7,07	2,51
20	9,72	2,56	10,63	2,36
21	9,23	2,17	9,70	2,07
22	8,48	2,30	7,87	2,64
23	9,42	1,94	8,27	2,39

	A_{LBM}	$b+1$
Durchschnitt	8,45	2,34
Standardabweichung	1,86	0,39
kleinster Wert	5,10	1,40
größter Wert	13,42	3,19

Tabelle 9: Faktoren 'A/LBM' (A_{LBM}) und 'b+1' für jeden Sportler im ersten und zweiten Test, sowie die entsprechenden Durchschnittswerte.

3.2.5 Faktoren A_{LBM} und 'b+1' im Vergleich

Ein graphischer Vergleich der Faktoren A_{LBM} und 'b+1' aus den zwei verschiedenen Tests zeigt eine auffällige Parallelität der meisten verbundenen Tests mit der Ausgleichsgeraden, sofern die Wertepaare nicht sogar fast identisch sind (siehe Abbildung 12). Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,44 und das Ergebnis ist sehr signifikant ($p < 0,01$). Es besteht also eine deutliche Kovarianz zwischen beiden Faktoren, wobei die Negativität des Korrelationskoeffizienten anzeigt, dass sie sich gegensätzlich zueinander verändern, d.h. wenn der eine Faktor steigt, sinkt der andere und umgekehrt.

Diese Beobachtung bedeutet, dass sich die Faktoren A_{LBM} und 'b+1' nicht unabhängig voneinander verändern, sondern die Veränderung einer bestimmten Regelmäßigkeit folgt. Dies bedeutet wiederum, dass man die Faktoren nicht einzeln betrachten kann, sondern erst eine Kombination beider Faktoren eine sinnvolle Vergleichsgrundlage darstellt. Die Ausgleichsgerade aller Datenpaare lautet: $A_{LBM} = 13,30 - 2,07 * (b+1)$ bzw. $A_{LBM} = 11,23 - 2,07 * b$.

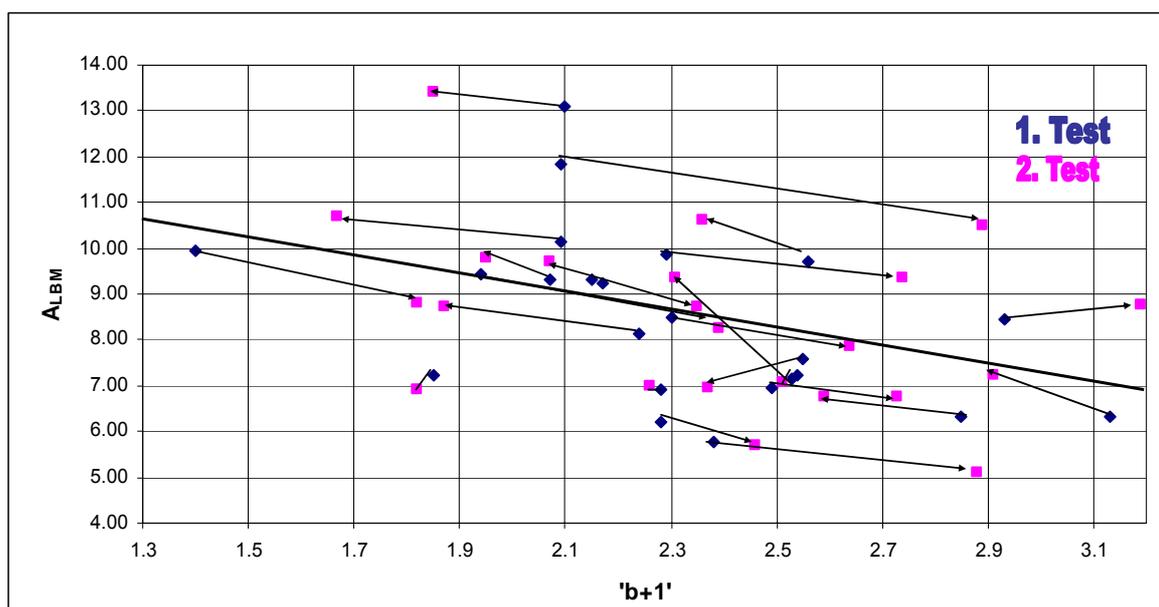


Abbildung 12: Die Faktoren A_{LBM} und 'b+1' sind gegeneinander aufgetragen und der erste und zweite Test jeder Person ist miteinander verbunden. Die Ausgleichsgerade aller gemessenen Wertepaare hat die Form $A_{LBM} = 13,30 - 2,07 * (b+1)$ bzw. $A_{LBM} = 11,23 - 2,07 * b$ ($p < 0,01$).

3.2.6 Technik-Index

Um die beiden Faktoren A_{LBM} und 'b+1' zusammen beurteilen zu können, wurde ein Technik-Index Z_T mit $Z_T = A_{LBM} + 2,07 * b$ definiert, der sich durch Umformen aus $A_{LBM} = Z_T - 2,07 * b$ ergibt. Diese Schreibweise ist eine Vereinfachung der Formel, die eigentlich Z

= $A_{LBM} + 2,07 \cdot (b+1)$ bzw. $A_{LBM} = Z - 2,07 \cdot (b+1)$ lautet. Z_T ist also um 2,07 kleiner als Z , aber wir müssen in Zukunft nur noch den Faktor 'b' statt 'b+1' schreiben.

Die Formel des Indexes ist offensichtlich von der Ausgleichgeraden abgeleitet, und Z_T steht dabei für die Konstante in der Geradengleichung: $A_{LBM} = Z_T - 2,07 \cdot b$

Die graphische Korrelation von Z_T ist der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der Ordinate in einer Darstellung der Funktion $f(b) = A_{LBM}$. Damit beschreibt Z_T , wie weit die individuell errechnete Gerade eines Individuums über oder unter der Ausgleichsgeraden liegt. Z_T beschreibt also im mathematischen Sinne den Abstand einer parallel zur Ausgleichsgeraden verschobenen Gerade.

3.2.7 Vergleich des Technik-Indexes Z_T mit A_{LBM} und 'b'

Der Technik-Index Z_T beträgt im Durchschnitt 11,23 bei einer Standardabweichung von 1,67. Der relative Fehler des Mittelwertes von Z_T beträgt nur 15%, während der relative Fehler für A_{LBM} bzw. 'b' 22% bzw. 29% beträgt (siehe Tabelle 10).

Das Signifikanzniveau (gepaarter t-Test) für den Technik-Index Z_T als Test auf Unterschiede zwischen erstem und zweitem Test liegt bei $p=0,05$ und damit knapp außerhalb des 95% Konfidenzintervalls. Der erste und zweite Test liefern also mit hoher Wahrscheinlichkeit die gleichen Ergebnisse für den Technik-Index Z_T .

Dies ist wichtig, weil ja ein möglichst konstantes Merkmal (hohe Reliabilität) gesucht wird, welches sich von einem Test zum anderen nur wenig verändert, in der Annahme, dass die Technik ein relativ konstantes Merkmal ist, welches keine großen Änderungen innerhalb einer Woche aufweist. Eine kleine Veränderung zwischen zwei verschiedenen Tests wäre allerdings zu erwarten, also nicht ungewöhnlich.

	Durchschnitt	Standardabweichung	relativer Fehler des Mittelwertes
Index Z_T	11,23	1.67	15%
A_{LBM}	8.45	1.86	22%
b	1.34	0.39	29%

Tabelle 10: Mittelwerte und relative Fehler für Z_T, A_{LBM} und 'b'.

3.3 Analyse der Faktoren A_{LBM} , b und Z_T

3.3.1 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für Sprinter, Mittel- und Langstreckler

Die Bestzeiten der Schwimmer über 100, 200m und 400m Freistil auf der 50m Bahn wurden mit Hilfe der FINA-Tabelle (Stand 01.01.1998) in Punkte umgerechnet. Sprinter erreichten dabei ihre höchste Punktzahl über 100m Freistil, Mittelstreckler über 200m Freistil und Langstreckler ihre höchste Punktzahl über 400m Freistil.

Die Unterschiede zwischen Sprintern, Mittel- und Langstrecklern sind in keinem Fall signifikant (siehe Tabelle 11).

Tendenziell haben jedoch die Sprinter eher einen größeren Faktor A_{LBM} und einen kleinen Faktor b, während es bei den Langstrecklern umgekehrt ist. Die Mittelstreckler nehmen eine Mittelstellung ein.

Der Technikindex Z_T zeigt keine eindeutige Tendenz.

	Sprinter (n=9)	StAbw	Mittelstreckler (n=6)	StAbw	Langstreckler (n=8)	StAbw
A_{LBM}	8.77	2.05	8.28	2.24	8.21	1.40
b	1.26	0.43	1.34	0.29	1.45	0.34
Z_T	11.38	1.84	11.06	1.98	11.21	1.43

Tabelle 11: Mittelwerte von A_{LBM} , b und Z_T für Sprinter, Mittel- und Langstreckler.

3.3.2 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für männliche und weibliche Schwimmer

Die Unterschiede von b sind signifikant ($p < 0,05$), wenn man weibliche und männliche Schwimmer vergleicht (siehe Tabelle 12). Auch bei Berücksichtigung von Größe, Gewicht oder Körperfettanteil in einer Kovarianzanalyse sind die Unterschiede noch signifikant ($p < 0,05$). Wenn man die Anzahl der Sprinter, Mittel- und Langstreckler in den Gruppen der männlichen und weiblichen Schwimmer berücksichtigt, ist das Ergebnis nur noch tendenziell signifikant ($p = 0,08$). Die Unterschiede von Z_T sind nur sehr gering und nicht signifikant. A_{LBM} ist für männliche Schwimmer tendenziell höher, korrespondiert aber auch mit dem deutlich kleineren b .

	weiblich (n=15)	StAbw	männlich (n=8)	StAbw
A_{LBM}	8,20	1,68	8,93	2,13
b	1,50^{*/*/-}	0,31	1,05^{*/*/-}	0,24
Z_T	11,31	1,51	11,10	2,04

Tabelle 12: Mittelwerte der Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Geschlecht. (Signifikanzniveau vor Kovarianzanalyse/ mit Berücksichtigung von Größe, Gewicht und Körperfett/ mit Berücksichtigung von Spezialisierung (Sprinter, Mittel- und Langstreckler)).

3.3.3 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Art des Beinschlages

Die Unterschiede bei unterschiedlichen Arten des Beinschlages sind in keinem Fall signifikant (siehe Tabelle 13). Tendenziell scheint jedoch ein 6er Beinschlag mit einem etwas höheren A_{LBM} und einem kleineren b zu korrespondieren.

	2er Beinschlag (n=11)		6er Beinschlag (n=12)	
		StAbw		StAbw
A_{LBM}	8.23	1.69	8.65	2.01
b	1.40	0.32	1.30	0.40
Z_T	11.13	1.82	11.33	1.60

Tabelle 13: Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt für Schwimmer mit 2er bzw. 6er Beinschlag ($p>0,05$).

3.3.4 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Alter

Die Unterschiede zwischen den zwei verschiedenen Altersgruppen sind signifikant ($p<0,05$) für den Technikindex Z_T (siehe Tabelle 14). Eine genauere Analyse mit Hilfe einer einfaktoriellen ANCOVA zeigt jedoch, dass bei Berücksichtigung der Leistungsklassen nach der FINA-Tabelle keine signifikanten Unterschiede mehr bestehen. Die Gruppe der jüngeren Sportler hat eine durchschnittliche Leistung nach der FINA-Tabelle von 614 Punkten, während die ältere Gruppe eine durchschnittliche Punktzahl von 776 erreicht.

	jünger als 18 Jahre (n=15)		18 Jahre und älter (n=8)	
		StAbw		StAbw
A_{LBM}	8,95	1,84	7,52	1,51
b	1,41	0,35	1,22	0,36
Z_T	11.87 ^{*/-}	1,48	10.04 ^{*/-}	1,35

Tabelle 14: Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für Schwimmer jünger als 18 Jahre bzw. 18 Jahre und älter (Signifikanzniveau vor/nach der Kovarianzanalyse).

3.3.5 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Leistungsklassen bzw. FINA-Punktezahl

Die Leistungsklassen werden wie unter 3.1.7 beschrieben nach der FINA-Tabelle in drei Kategorien entsprechend ihrer 200m Freistil-Bestzeit (50m-Bahn) in Schwimmer mit mehr als 800 Punkten, Schwimmer mit Punktzahlen zwischen 600 und 800 und Schwimmer mit weniger als 600 Punkten eingeteilt.

Die Unterschiede für A_{LBM} sind signifikant ($p < 0,05$) zwischen der besten und der leistungsschwächsten Gruppe (siehe Tabelle 15).

Die Unterschiede für den Faktor b sind in keinem Fall signifikant.

Die Unterschiede für Z_T sind signifikant ($p < 0,05$) zwischen der besten und der mittleren Gruppe, während die Unterschiede zwischen der besten und leistungsschwächsten Gruppe, hochsignifikant ($p < 0,001$) sind.

Sowohl A_{LBM} als auch Z_T sind bei der schwächsten Leistungsgruppe signifikant größer ($p < 0,05$ bzw. $p < 0,001$), während b keine eindeutigen Unterschiede zwischen den einzelnen Leistungsgruppen aufweist.

	Leistungsklassen nach FINA-Tabelle					
	über 800 Punkte (n=4)		600-800 Punkte (n=13)		weniger als 600 Punkte (n=6)	
	Durchschnitt	StAbw	Durchschnitt	StAbw	Durchschnitt	StAbw
A_{LBM}	6,36 *	0.83	8.38	1.48	9,99 *	1.82
b	1.28	0.33	1.37	0.37	1.33	0.40
Z_T	9,00 * ^{***}	0.40	11,23 *	0.99	12,73 ***	1.76

Tabelle 15: Durchschnitt der Faktoren A_{LBM} , b und Z_T in verschiedenen Leistungsklassen.

Für den Technikindex Z_T ergibt sich eine Beziehung zu der FINA-Punkteleistung wie in Abbildung 13 gezeigt. Je höher die FINA-Punkteleistung, desto kleiner ist der Technikindex Z_T . Diese Beziehung ist statistisch hochsignifikant ($p < 0,001$).

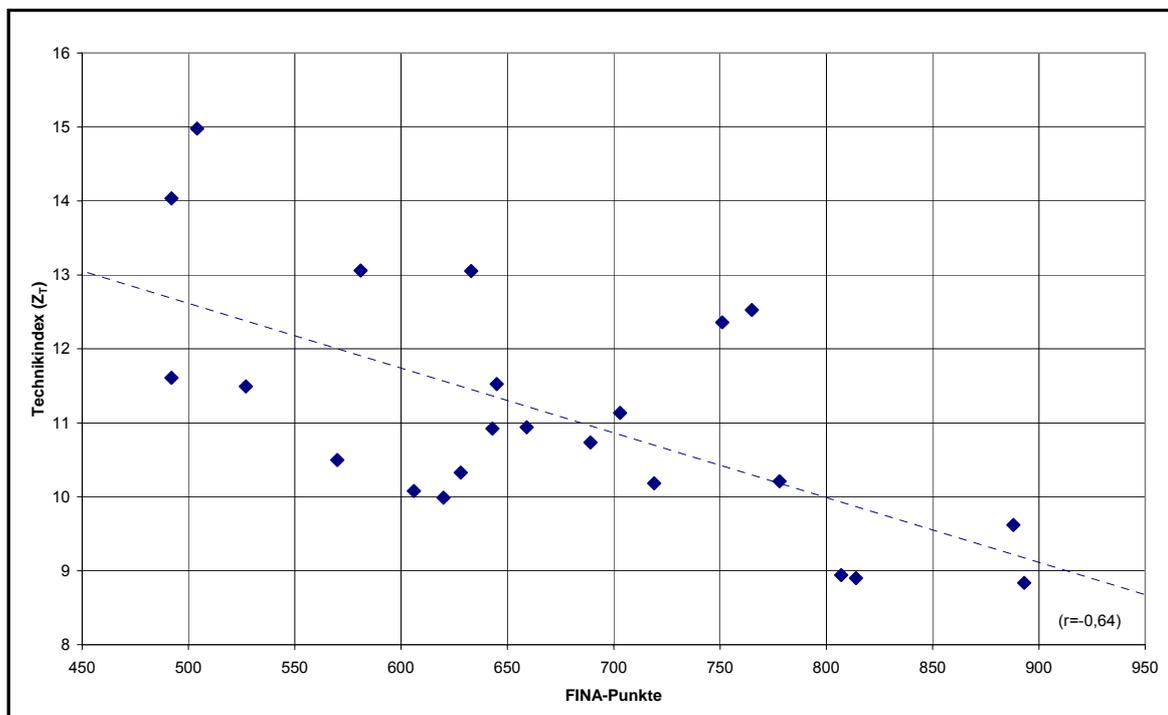


Abbildung 13: Technikindex Z_T in Abhängigkeit von der FINA-Punkteleistung ($p < 0,001$).

Eine Betrachtung der Korrelationen zwischen dem Technikindex Z_T und verschiedenen anthropometrischen Daten ergibt statistisch signifikante ($p < 0,05$) Korrelationen bis auf die Korrelation zwischen Z_T und dem Körperfettanteil, die nicht signifikant ist (siehe Tabelle

16). Die Körperoberfläche ist ein Merkmal, das aus Körpergewicht und –größe rechnerisch ermittelt wurde: Körperoberfläche = $0,007184 * (\text{Gewicht})^{0,425} * (\text{Größe})^{0,725}$ (46).

Das negative Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten zeigt an, dass der Index Z_T abnimmt, wenn die Merkmale Größe, Gewicht und Körperoberfläche zunehmen.

Selbst wenn man den Effekt der Körperoberfläche berücksichtigt und mit einer einfaktoriellen ANCOVA herausrechnet, ergeben sich die gleichen Signifikanzniveaus zwischen den verschiedenen Leistungsgruppen bezogen auf den Index Z_T wie in Tabelle 16. Das bedeutet, dass es zwar eine signifikante Beziehung zwischen den anthropometrischen Größen und dem Index Z_T gibt, aber dieser Zusammenhang erklärt nicht den signifikanten Unterschied von Z_T in den unterschiedlichen Leistungsgruppen.

	FINA Punkte	Oberfläche	Gewicht	Größe	LBM	Körperfettanteil
Z_T	-0,68*	-0,53*	-0,51*	-0,51*	-0,47*	0,11

Tabelle 16: Korrelationskoeffizienten der Kovarianzen verschiedener Merkmale mit dem Index Z_T .

3.3.6 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für drei Kategorien des Frequenzverhaltens

Die Unterschiede von A_{LBM} , b und Z_T in den drei verschiedenen Kategorien der Zyklusfrequenz sind nicht signifikant (siehe Tabelle 17). Die Korrelation wird noch geringer, wenn man mit einer einfaktoriellen ANCOVA die unterschiedliche Leistungsfähigkeit herausrechnet. Die Gruppe mit der niedrigsten Durchschnittsfrequenz erreicht im Mittel 761 Punkte nach der FINA-Tabelle, die Gruppe mit Durchschnittsfrequenzen zwischen 30 und 33 Zyklen pro Minute erreicht im Mittel 661

Punkte und die Gruppe mit der höchsten Durchschnittsfrequenz erreicht im Mittel 628 Punkte nach der FINA-Tabelle.

Tendenziell sind jedoch sowohl A_{LBM} und Z_T in der Gruppe mit Frequenzen zwischen 30 und 33 Zyklen pro Minute am niedrigsten, während der Faktor b bei höheren Zyklusfrequenzen größer ist.

	Durschnittliche Frequenz bei allen Geschwindigkeiten (Zykl./min.)					
	<30 (n=4)	StAbw	30-33 (n=11)	StAbw	>33 (n=8)	StAbw
A_{LBM}	9,20	0,33	7,69	1,66	9,13	2,19
b	1,01	0,28	1,39	0,34	1,47	0,35
Z_T	11,29	0,46	10,53	1,49	12,17	1,92

Tabelle 17: Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für drei unterschiedliche Kategorien der durchschnittlichen Zyklusfrequenz bei allen Geschwindigkeiten (weniger als 30 Zyklen pro Minute, zwischen 30 und 33 und mehr als 33 Zyklen pro Minute).

Der Durchschnitt der Frequenzen bei allen Geschwindigkeiten berücksichtigt nicht, dass einige Schwimmer die hohen Geschwindigkeitsstufen nicht erreichen. Aber auch bei einer Geschwindigkeit von 1,37 m/s, die alle Schwimmer erreicht haben, ergeben sich keine signifikanten Unterschiede (siehe Tabelle 18), selbst bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Leistungsklassen nach der FINA-Tabelle.

	Durschnittliche Frequenz bei 1,37 m/s (Zykl./min.)					
	<33 (n=4)	StAbw	33-38 (n=11)	StAbw	>38 (n=8)	StAbw
A_{LBM}	8,55	1,08	7,82	1,65	9,27	2,18
b	1,07	0,31	1,47	0,33	1,38	0,39
Z_T	10,78	0,88	10,76	1,55	12,12	1,90

Tabelle 18: Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für drei unterschiedliche Kategorien der durchschnittlichen Zyklusfrequenz bei einer Geschwindigkeit von 1,37 m/s (weniger als 33 Zyklen pro Minute, zwischen 33 und 38 und mehr als 38 Zyklen pro Minute).

3.3.7 Größe der Sportler in den verschiedenen Kategorien des Frequenzverhaltens

Der Unterschied zwischen der Gruppe mit der niedrigsten und der höchsten Frequenz ist sehr signifikant ($p < 0,05$) (siehe Tabelle 19). Die Gruppe mit den niedrigsten Frequenzen ist im Durchschnitt am größten, die mit den höchsten Frequenzen im Schnitt 18 cm kleiner.

	Durschnittliche Frequenz bei 1,37 m/s (Zykl./min.)					
	<33 (n=5)	StAbw	33-38 (n=11)	StAbw	>38 (n=7)	StAbw
Größe (m)	1,84*	0,08	1,74	0,09	1,66*	0,08

Tabelle 19: Größe der Sportler in drei unterschiedlichen Kategorien der durchschnittliche Schlagfrequenz bei einer Geschwindigkeit von 1,37 m/s (weniger als 33 Zyklen pro Minute, zwischen 33 und 38 und mehr als 38 Zyklen pro Minute).

3.3.8 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T unterteilt nach Kategorien der Körpergrößen

Der Unterschied für den Faktor b zwischen den beiden Größenkategorien ist signifikant ($p < 0,05$) (siehe Tabelle 20), während der Unterschied für Z_T nur tendenziell signifikant ist ($p = 0,07$).

	Größenkategorien			
	Frauen > 170cm (n=12)		Frauen ≤ 170cm (n=11)	
	Männer >180cm	StAbw	Männer ≤ 180cm	StAbw
A_{LBM}	8,15	1,58	8,78	2,10
b	1,20*	0,31	1,50*	0,36
Z_T	10,63	1,38	11,89	1,76

Tabelle 20: Faktoren A_{LBM} , b und Z_T unterteilt in die angegebenen Größenkategorien.

3.3.9 Korrelationskoeffizienten der Kovarianzen für verschiedene Merkmale

Die Tabelle 21 zeigt, wie verschiedene Merkmale miteinander korrelieren. Die Korrelation lässt dabei keine Aussage über die Kausalität des Zusammenhanges zu. Je größer der absolute Wert der Korrelationskoeffizienten, desto größer ist die Kovarianz der beiden Merkmale.

Es können an dieser Stelle nicht alle signifikanten Ergebnisse genauer betrachtet werden, aber einige wichtige sollen herausgehoben werden.

Z.B. korreliert die FINA-Punktzahl (die für uns das Maß für die Wettkampfleistungsfähigkeit darstellt) signifikant positiv mit der Körpergröße und der Körperoberfläche. Die stärkste Korrelation besteht aber im Vergleich mit dem Index Z_T , wobei diese Korrelation negativ ist. Die Faktoren A_{LBM} , b und Z_T korrelieren untereinander signifikant, weil Z_T von diesen Größen abgeleitet ist und die deutliche Korrelation von A_{LBM} und b die Bildung des Indexes Z_T erst möglich gemacht hat. Der Faktor b scheint dabei aber völlig unabhängig von sowohl Z_T als auch den FINA-Punkten zu sein. Gewicht, Körpergröße und Körperoberfläche hängen wiederum miteinander zusammen und sind daher untereinander stark korreliert. Diese drei Größen korrelieren außerdem signifikant mit den Faktoren A_{LBM} , b und Z_T , wobei größere Körperausmaße mit besseren Werten von b und Z_T korreliert sind (eine negative Korrelation zeigt an, dass diese Faktoren kleiner (=besser) werden, wenn die Körperausmaße zunehmen), A_{LBM} dagegen zunimmt, wenn die Körperdimensionen zunehmen.

Von Bedeutung könnte auch sein, dass ein hoher Körperfettanteil mit einem hohen Faktor b , aber einem niedrigen Faktor A_{LBM} korreliert, während sowohl die FINA-Punkte als auch der Index Z_T keine signifikante Relation zeigen.

	FINA-Punkte	A _{LBM}	b	A	Gewicht	Größe	Körperfett	Körperoberfläche	LBM	Index Z _T
FINA-Punkte	1,00									
A _{LBM}	-0,61 *	1,00								
b	-0,01	-0,42 *	1,00							
A	-0,27	0,71 *	-0,78 *	1,00						
Gewicht	0,41	-0,25	-0,52 *	0,47 *	1,00					
Größe	0,47 *	-0,22	-0,60 *	0,47 *	0,88 *	1,00				
Körperfett	-0,09	-0,12	0,53 *	-0,48 *	-0,33	-0,56 *	1,00			
Körperoberfläche	0,45 *	-0,25	-0,57 *	0,49 *	0,98 ***	0,95 ***	-0,43 *	1,00		
LBM	0,37	-0,19	-0,61 *	0,55 *	0,96 **	0,91 *	-0,59 *	0,97 ***	1,00	
Index Z _T	-0,68 *	0,91 *	-0,01	0,43 *	-0,51 *	-0,51 *	0,11	-0,53 *	-0,47 *	1,00

Tabelle 21: Korrelationskoeffizienten der Kovarianzen für verschiedene anthropometrische Merkmale, die Leistung nach der FINA-Tabelle und die Faktoren A_{LBM} und b, sowie den Index Z_T.

3.4 Parameter der maximalen Leistungsabgabe

3.4.1 Maximale Sauerstoffaufnahme

Der höchste Wert der Sauerstoffaufnahme (gemittelt über 10 Sekunden) wurde für jeden Sportler ermittelt. Die durchschnittliche maximale relative Sauerstoffaufnahme betrug $58,3 \pm 8,0$ ml O₂/ kg Körpergewicht bzw. $69,4 \pm 9,0$ ml O₂/ kg LBM. Die höchste relative Sauerstoffaufnahme betrug 72,0 ml O₂/ kg Körpergewicht. Abbildung 14 zeigt die individuellen Werte der maximal gemessenen Sauerstoffaufnahme in Relation zum Körpergewicht. Der Korrelationskoeffizient beträgt $r=0,69$ und ist signifikant ($p<0,05$).

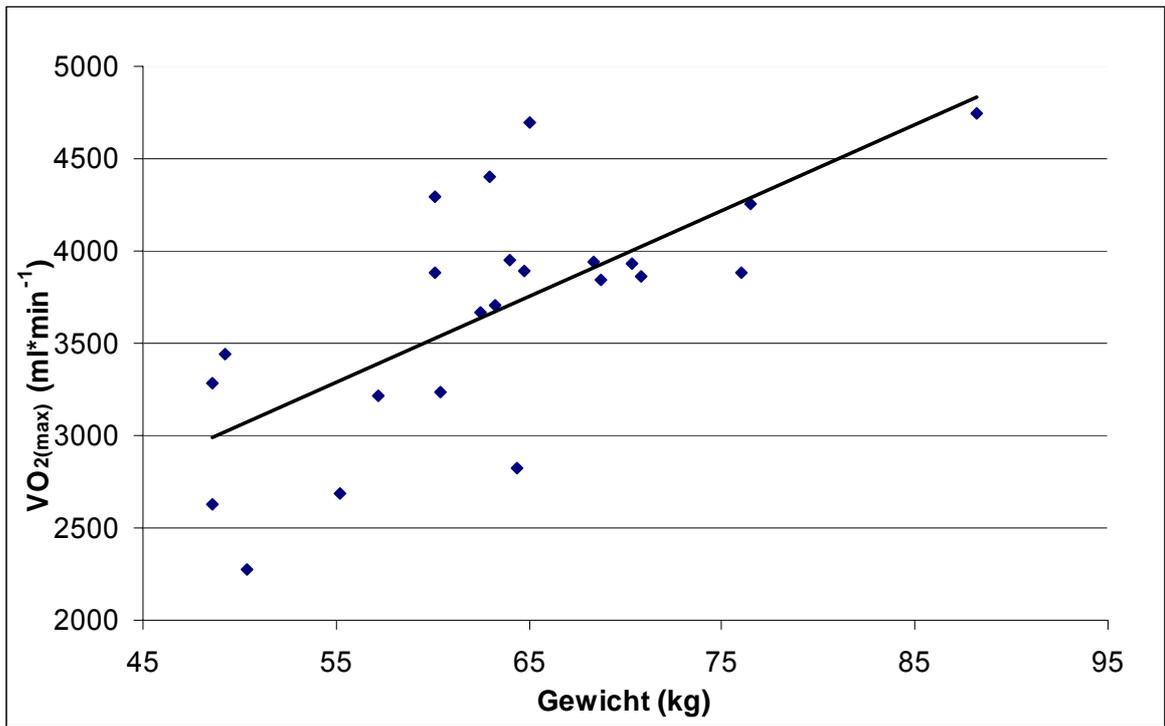


Abbildung 14: Maximal gemessene Sauerstoffaufnahme im Stufentest in Abhängigkeit vom Körpergewicht für alle Schwimmer ($p < 0,05$).

4. Diskussion

4.1 Messdaten

4.1.1 Ruhesauerstoffverbrauch im Wasser

Der gemessene Ruhesauerstoffverbrauch im Wasser entspricht ungefähr den Werten, die auch andere Autoren gemessen haben (30,97,142). Mit Regressionsgeraden hat Toussaint (142) ermittelt, dass bei passivem Verweilen im Wasser ca. 165 W metabolische Leistung abgegeben werden, bei einem Durchschnittsgewicht der Gruppe von 74,7 kg. 165 W entsprechen bei einem RQ von 0,90 etwa 483 ml O₂/ min. Unsere Messungen ergaben einen Ruheverbrauch von 7,84 ml O₂/(min * kg (LBM)). Nimmt man einen durchschnittlichen Körperfettanteil von 17,5% in der Gruppe und ein Gewicht von 74,7 kg an, ergibt sich auch für die von Toussaint gemessenen Werte ein Sauerstoffverbrauch von genau 7,84 ml O₂/(min * kg (LBM)).

Auch wenn wir den Körperfettanteil der von Toussaint getesteten Probanden nicht kennen, so kann dieser Wert als realistisch angesehen werden und entspricht den in der Literatur bekannten Werten von 14-19% für weibliche und 5-10% für männliche Leistungsschwimmer (43,99,130).

Die relative Sauerstoffaufnahme hat gegenüber der absoluten den Vorteil, dass Sie den Vergleich zwischen unterschiedlich großen und schweren Individuen ermöglicht, denn eine größere stoffwechselaktive Masse wird absolut gesehen mehr Sauerstoff verbrauchen als eine kleinere (57,77,114). Von Interesse für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit ist jedoch im Allgemeinen, ob die erreichte Sauerstoffaufnahme für die Körperproportionen angemessen ist (57). Es ist sowohl der Bezug auf das Körpergewicht (36,41, 57, 96,156)

als auch der Bezug auf die LBM bekannt (25,95). Costill (25) konnte zeigen, dass die LBM einen höheren Voraussagewert für die Transportkosten ("energy cost") (ml/m) im Freistilschwimmen hat als das Körpergewicht mit Fettanteil. Moody (95) zeigte, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen der maximalen Sauerstoffaufnahme für Männer und Frauen mehr auftreten, wenn man diese auf die LBM bezieht.

Insgesamt erscheint es also sinnvoll, die LBM als Bezugsgröße für den Sauerstoffverbrauch zu wählen, wenn verschiedene Individuen auch unterschiedlichen Geschlechts miteinander verglichen werden sollen.

4.1.2 Bedeutung des Netto-Sauerstoffverbrauchs

Wirkungsgrade sind für sportliche Aktivität von Bedeutung, da immer nur ein kleinerer Teil der aufgewendeten Leistung auch in Bewegung (extern messbare Leistung) umgewandelt wird. Im Schwimmen ist dies von besonderer Bedeutung, da Wirkungsgrade im Vergleich zum Radfahren oder Laufen (41,116) relativ klein sind und sich außerdem zwischen geübten und ungeübten Sportlern stark unterscheiden (65).

Im Zusammenhang mit Wirkungsgraden benötigt man eine Nettoleistung oder eine Nettosauerstoffaufnahme als Bezugsgröße, denn ein Wirkungsgrad ist das Verhältnis von abgegebener Leistung (P_{out}) zu aufgewendeter Leistung (P_{in}) (57). Es besteht aber nur eine direkte Proportionalität, wenn für die aufgewendete Leistung auch nur der Anteil der Leistung verwendet wird, der auch wirklich für die Erzeugung der Ausgangsleistung aufgewendet wird. P_{in} ist also die Differenz von Gesamtenergieumsatz (E) und Ruheumsatz (e): $P_{in} = E - e$.

Auf diese Weise werden Wirkungsgrade im Fahrradfahren oder Laufen ermittelt (41,116). Toussaint (142) hat mit dem MAD-System den mechanischen Wirkungsgrad (gross efficiency, e_g) gemessen und ist zu dem Ergebnis gekommen, dass der mechanische Wirkungsgrad (gross efficiency) nicht konstant ist. Wie bereits in der Einleitung unter 1.1 beschrieben, ist der mechanische Wirkungsgrad als Quotient von mechanisch erzeugter Leistung zu metabolisch erzeugter Leistung ($P_{\text{mech}}/P_{\text{in}}$) definiert. Er ermittelte folgende Gleichungen bei Schwimmern: $P_{\text{mech}} = 0,093 * P_{\text{in}} - 15,8$ (Frauen) und $P_{\text{mech}} = 0,097 * P_{\text{in}} - 15,8$ (Männer). Der positive Achsenabschnitt beträgt dabei 165 W und entspricht damit ziemlich genau den Ruhebedingungen im Wasser wie unter 4.1.1 erwähnt. Wenn man also für P_{in} wirklich nur die Netto-Leistung berücksichtigt, ergibt sich eine direkte Proportionalität ($P_{\text{mech}} = 0,093 * P_{\text{in-net}}$ (Frauen) und $P_{\text{mech}} = 0,097 * P_{\text{in-net}}$ (Männer)). Der mechanische Wirkungsgrad (gross efficiency) entspricht folglich Werten von 9,3% bzw. 9,7%. Die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen waren jedoch nicht signifikant. Auch die Unterschiede innerhalb der Gruppen waren nicht signifikant.

Der mechanische Wirkungsgrad (gross efficiency) wird daher als für gute und schlechte Schwimmer gleich groß angesehen (141,142).

In anderen Sportarten wurden mechanische Wirkungsgrade ermittelt, die zwischen 20% und 40% für Gehen, 23%-80% für Laufen und 24%-30% für Radfahren lagen (156). Ein Review von Williams (156) beschreibt die unterschiedlichen Ergebnisse und Annahmen, die Einfluss auf die Ergebnisse haben. Die interindividuellen Unterschiede werden grundsätzlich als gering und nicht signifikant angesehen und die deutlich unterschiedlichen Ergebnisse zwischen verschiedenen Versuchsergebnissen hängen von der unterschiedlichen Definition und Messweise ab. Im Radfahren geht man von einem mechanischen Wirkungsgrad von 22%-25% aus, wobei dieser unter anderem von der Tretfrequenz abhängt und die höchsten Werte für Frequenzen um 1Hz erreicht werden.

Der mechanische Wirkungsgrad ist natürlich nur einer der beiden Faktoren, die den Schwimmwirkungsgrad ausmachen. Der andere Faktor, der Antriebswirkungsgrad, wird aber aus der Messung des Schwimmwirkungsgrades und des mechanischen Wirkungsgrades abgeleitet: mechanischer Wirkungsgrad * Antriebswirkungsgrad = Schwimmwirkungsgrad, folglich ist der Antriebswirkungsgrad = Schwimmwirkungsgrad / mechanischer Wirkungsgrad. Toussaint (142) bestimmt vornehmlich den Antriebswirkungsgrad und in diesem Fall ist es nicht von Bedeutung, ob die Netto- oder Bruttoeingangsleistung für die Berechnung verwendet wird, denn $E_{prop} = E_{swim} / E_{mech}$. Mit $E_{swim} = P_{out} / P_{in}$ und $E_{mech} = P_{out(mech)} / P_{in}$ ergibt sich für $E_{prop} = P_{out} * P_{in} / (P_{in} * P_{out(mech)}) = P_{out} / P_{out(mech)}$.

Wie unter 1.3 erwähnt, ermittelte der Autor deutlich unterschiedliche Antriebswirkungsgrade für Triathleten (44%) und Schwimmer (61%). Außerdem ermittelte er auch für Schwimmer unterschiedliche Werte, je nachdem ob es sich um Sprinter (48%), Mittelstreckler (56%) oder Langstreckler (62%) handelte. Holmer (65) ermittelte Schwimmwirkungsgrade für verschiedene Stilarten (Brustschwimmen und Freistilschwimmen) und isolierte Arm- oder Beinbewegungen. Seine Ergebnisse an den 3 getesteten Schwimmern ergaben Werte im Brustschwimmen von 3,8%-5,7% und 5,6%-6,6% im Freistilschwimmen. Geringere Antriebswirkungsgrade ergaben sich für den isolierten Beinschlag (1,3%-4,4%), während die Armbewegung ähnliche Werte wie das Schwimmen in der Gesamtlage ergab, in einem Einzelfall sogar 7,7% (also höher als in der Gesamtbewegung).

Für die Ermittlung des Antriebswirkungsgrades (E_{prop}) ist also nicht von Bedeutung, ob die Netto- oder Bruttoleistung gemessen wird. Will man aber den mechanischen Wirkungsgrad oder wie im Falle dieser Studie den Schwimmwirkungsgrad bestimmen, ist es besonders

wichtig, für die aufgewendete Leistung wirklich nur die Netto-Leistung zu berücksichtigen.

4.1.3 Netto-Leistung bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Der Netto-Sauerstoffverbrauch wird mit Hilfe des kalorischen Äquivalents in Leistung umgerechnet. Dies ist ein übliches Verfahren, jedoch streng genommen nur unter aeroben Stoffwechselbedingungen genau. Die Netto-Leistung ist dabei eine Funktion von RQ und Sauerstoffverbrauch der Form $P_{\text{net}} = (4,940 * RQ + 16,040) * VO_{2\text{-netto}} / 60$ (7,11,141,142). Zusätzlich wird die anaerob erzeugte Leistung, wie unter 3.1.3 beschrieben, berechnet, um auch den anaerob erzeugten Anteil der Leistung berücksichtigen zu können (11,114,116).

Aus der Abbildung 2 ist zu erkennen, dass die Netto-Leistung keine lineare Funktion der Geschwindigkeit ist. Die genaue Funktion soll später betrachtet werden. Die aus der Literatur bekannten Modelle reichen von einer Funktion der 2. Potenz der Geschwindigkeit (20,111), 3. Potenz der Geschwindigkeit (7,43,91) bis zu einem Modell einer Potenzfunktion ($y = A * x^b$) (136,137,138). Der Anteil der anaerob, laktazid bereitgestellten Energie steigt ab einer Geschwindigkeit von 1,28 m/s an und erreicht in der höchsten Stufe einen Anteil von maximal 16% an der insgesamt erzeugten Netto-Leistung.

4.1.4 Herzfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Die Herzfrequenz ist ein einfaches Maß zur groben Bestimmung der Belastungsintensitäten. Die Bestimmung der Herzfrequenz im Training kann von den Athleten selbst durchgeführt werden.

Die gemessenen Werte beim vorliegenden Probandengut zeigen, dass im Durchschnitt eine gute Ausbelastung mit Herzfrequenzen von 180 Schlägen pro Minute erzielt wurde. Auch wenn eine maximale Ausbelastung für die Auswertung des Tests nicht unbedingt nötig war, erreichten die meisten Aktiven zumindest submaximale Belastungsstufen.

Die große Streuung bei Geschwindigkeiten zwischen 1,19 und 1,37 m/s ist dadurch zu erklären, dass die Herzfrequenzen Durchschnittswerte von allen Schwimmern darstellen. Während einige bei diesen Geschwindigkeiten schon submaximale oder maximale Herzfrequenzen erreicht haben, entsprechen diese Geschwindigkeiten bei anderen Personen erst einem mehr oder weniger intensiven Ausdauertraining mit Herzfrequenzen im Ausdauerbereich. Die Standardabweichung als Maß für die Schwankung der individuellen Werte vom Mittelwert ist in diesem Bereich natürlich besonders groß.

Beim Schwimmen wird in der Literatur von maximalen Herzfrequenzen berichtet, die deutlich niedriger sind als im Laufen oder Radfahren (58,60,61,85), der Anstieg ist jedoch bei allen drei Sportarten linear, was die vorliegenden Messwerte bestätigen. Holmer ermittelt z.B. Werte für die maximale Herzfrequenz von 183 Schlägen pro Minute im Schwimmen, 191 im Radfahren und 193 im Laufen (58). Der durchschnittliche Blutdruck liegt im Schwimmen mit 132 mmHg im Vergleich zu 114 mmHg im Laufen deutlich höher (60). Holmer gibt auch Erklärungsversuche, warum sich die Kreislaufreaktion im Schwimmen von der an Land unterscheidet. Schwimmen wird erstens in einer horizontalen Position ausgeführt, zweitens ist die Atmung eingeschränkt, drittens lastet durch den

Wasserdruck ein höherer Druck auf dem Körper und viertens ist der Wärmeverlust bzw. die Wärmeabgabe größer. Schon das Atmen durch einen Schnorchel mit dem Kopf unter Wasser führt zu einer Bradykardie (58). Die Vitalkapazität einer bis zum Hals im Wasser sitzenden Person ist im Vergleich zu Bedingungen an Land um 8%-10% reduziert, was auf ein erhöhtes Blutvolumen im Thorax und einen erhöhten Atemwegswiderstand zurückgeführt wird (1,67).

4.1.5 Blutlaktatwerte bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Die Messung der Blutlaktatwerte war nötig, um den Anteil der anaerob erzeugten Leistung zu ermitteln, wie unter 3.1.3 beschrieben. Als derzeitiges Standardverfahren bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Schwimmern (101,125,126) erschien es außerdem sinnvoll, die Laktatwerte zum Vergleich zu ermitteln.

Auch für die unter 3.1.5 gezeigten Laktatwerte gilt, dass die Streuung teilweise erheblich ist, da eine Geschwindigkeitsstufe unterschiedlichen Belastungsintensitäten von verschiedenen Individuen entspricht. Auch eine Unterteilung in Untergruppen wie Sprinter und Langstreckler ergibt keinen weiteren Aufschluss über die Verteilung der Laktatwerte, da die Leistungsunterschiede insgesamt erheblich sind. Die Laktatwerte sind eine sinnvolle Grundlage für die Beurteilung individueller Sportler im Längsschnitt, eine Beurteilung einer Gruppe im Querschnitt kann jedoch nur grob orientierend sein.

Die Tatsache, dass im Durchschnitt im ersten und zweiten Test praktisch identische Laktatwerte erreicht wurden, belegen die konstanten Messbedingungen im Kanal, was nicht selbstverständlich ist, da die Strömungsgeschwindigkeit unter anderem von der Position im Kanal und dem Wasserstand abhängt. Aus diesem Grunde war es besonders

wichtig, die Testbedingungen genau einzuhalten. Es wurde streng darauf geachtet, dass Wasserstand und Position des Schwimmers im Becken konstant gehalten wurden. Als Schwimmposition wurde eine Markierung gewählt, die durch Eichungen des Schiffahrtstechnischen Institutes Hamburg überprüft wurde. Die Daten bestätigen, dass diese Einflussgrößen erfolgreich kontrolliert wurden.

Die höchsten Laktatwerte in der Nachbelastung traten immer innerhalb der ersten 4 Minuten auf, so dass eine längere Messung (über die 7. Minute hinaus) nicht nötig war.

Interessant erscheint bei den dargestellten Laktatwerten vor allem der Abfall der Laktatwerte in der Erholungsphase. Während im ersten Test eine Verringerung von im Durchschnitt maximal 5,1 mmol Laktat sofort nach der Belastung auf 3,0 mmol in der 7. Minute nach Belastungsende erreicht wird, verringert sich im zweiten Test der Laktatwert von anfangs 4,8 mmol nur auf 3,6 mmol.

Dies deutet darauf hin, dass zwischen dem 1. und 2. Test eine Trainingssituation eingetreten ist, die zumindest vorübergehend zu einer geringeren Leistungsfähigkeit geführt hat, denn im 2. Test erholen sich die Testpersonen nicht mehr so schnell. Pelayo (106) berichtet, dass die Laktatwerte in der Erholungsphase ein guter Indikator für Übertrainingszustände sein können, da die Erholungsfähigkeit bei Übertraining abnimmt, bei Training, welches zu einer allgemeinen Leistungsverbesserung führt, jedoch zunimmt. Die Trainingsanamnese der untersuchten Sportlergruppe unterstützt diese These. Der Testzeitraum stellte für viele Athleten der Gruppe eine Art Trainingslager dar und es trat subjektiv wie objektiv eine vorübergehende Überlastung (Müdigkeit, reduzierter Motivation) auf, so dass zum Zeitpunkt des zweiten Tests tendenziell ein ‚nicht ausreichender Erholungszustand‘ sehr wahrscheinlich erscheint.

Insgesamt sind die erreichten Laktatwerte eindeutig als submaximal einzuschätzen. Eine Ausbelastung im metabolischen Sinne wurde nicht erreicht, war jedoch auch nicht gefordert.

4.1.6 Zyklusfrequenzen bei den einzelnen Geschwindigkeitsstufen

Auch die Zyklusfrequenzen zwischen erstem und zweitem Test unterscheiden sich fast nicht, was wiederum für konstante Testbedingungen spricht.

Die Zyklusfrequenzen reichen im Durchschnitt von 27 bis 40 min^{-1} , was Werten entspricht, die z.B. Pelayo (107) veröffentlicht hat. Er weist darauf hin, dass die Zyklusfrequenz natürlich auch von der Belastungsdauer abhängt. Bei maximalen Belastungen über 200m und 400m Freistil berichtet er von durchschnittlichen Zyklusfrequenzen von 44 bzw. 41 min^{-1} . Eine Belastung von 3 Minuten wie in unseren Tests liegt ungefähr zwischen diesen Werten.

Auch die dabei ermittelten Zuglängen entsprechen der Größenordnung, der von uns gemessenen Werte.

Pease (105) berichtet, dass Schwimmer bei geringen oder moderaten Geschwindigkeiten die Schwimmgeschwindigkeit durch eine zunehmende Zykluslänge steigern. Erst ab einem kritischen Punkt, der individuell verschieden ist, kann die Zykluslänge nicht mehr gesteigert werden und fällt deutlich ab, während die Zyklusfrequenz deutlich zunimmt. Dies ist auch bei den von uns gemessenen Frequenzen zu erkennen. Bei den höchsten Geschwindigkeiten fällt die Zykluslänge wieder ab. Auch die Zyklusfrequenz bleibt relativ lange konstant und steigt erst bei hohen Geschwindigkeiten stärker an. Die Interpretation dieser Ergebnisse könnte sein, dass der Körper automatisch die ökonomischere Variante

der Geschwindigkeitssteigerung wählt, was hier eine Steigerung der Zuglänge zu sein scheint. Sobald der Schwimmer höhere Geschwindigkeiten erreicht, bewegt sich der Körper mit einer höheren Geschwindigkeit über die Hand, was zur Folge hat, dass bei gleicher zeitlicher Verweildauer der Hand im Wasser ein größerer Weg zurückgelegt wird, was dann einer höheren Geschwindigkeit entspricht. Entgegen der Laienmeinung ist es nämlich nicht so, dass sich die Hand nach hinten unter dem Körper bewegt, sondern der Körper sich über die Hand (die eine relativ konstante Position im Wasser hält) hinwegbewegt.

Da alle Daten gemittelt sind, ist dieser Effekt im Schnitt aller Probanden nicht deutlich sichtbar. Es sind nur die leistungsstärksten Schwimmer, die auch die höchsten Geschwindigkeitsstufen erreichen (n=6). Der moderate Anstieg der durchschnittlichen Frequenzen im mittleren Geschwindigkeitsbereich ist wesentlich darauf zurückzuführen, dass die leistungsstärksten Schwimmer in diesem Bereich noch relativ geringe Zyklusfrequenzen aufweisen.

Insgesamt zeigen die Zyklusfrequenzen, dass die Bedingungen im Kanal mit denen im freien Schwimmen vergleichbar sind.

4.1.7 Zyklusfrequenzen getrennt nach Leistungsgruppen

Wenn man die Frequenzen getrennt nach Leistungsgruppen betrachtet, fallen erstaunlich geringe Differenzen auf. Die Unterschiede sind bis auf eine Ausnahme nicht signifikant und diese Ausnahme bildet nur ein einziger Athlet. Wenn man dann zusätzlich bedenkt, dass die stärkste Gruppe im Schnitt 1,83 m groß ist, während die anderen Gruppen im Durchschnitt 1,72 m bzw. 1,70 m groß sind, erscheinen die Unterschiede noch geringer.

Eine geringe Zyklusfrequenz wird als Merkmal einer guten Technik angesehen (25,32,35,40,51,118,135) und der bessere Schwimmer soll sich vom schlechteren durch eine größere Zykluslänge und geringere Frequenz auszeichnen. Viele Trainingsübungen zielen darauf ab, das Schwimmen mit geringen Zyklusfrequenzen zu lernen.

Bei unseren Probanden fanden wir jedoch keine signifikanten Unterschiede in den Zyklusfrequenzen von guten oder schlechten Schwimmern. In neusten Untersuchungen fand Mason (88) jedoch ebenso, dass es außer im 50m und 100m Freistilschwimmen der Männer keine signifikante Beziehung zwischen Zykluslänge oder Frequenz und der Leistung gibt.

Untersuchungen von Pelayo (107) zeigen, dass von einer Verbesserung der Leistung auszugehen ist, wenn bei gleichbleibender Geschwindigkeit die Zyklusfrequenz abnimmt und die Zykluslänge steigt oder die Frequenz gleich bleibt und Zykluslänge steigt, wodurch sich die Geschwindigkeit erhöht. Diese Aussage ist nicht unbedingt gleichbedeutend mit der Aussage, dass bessere Schwimmer generell eine geringere Frequenz und höhere Zykluslänge haben. Eine positive Veränderung von Zykluslänge oder Zyklusfrequenz kann entweder durch eine höhere Leistungsfähigkeit oder eine bessere Ökonomie bedingt sein. Vor allem ist es schwierig nur die Veränderung einer Messgröße, wie zum Beispiel der Frequenz, im Sinne einer verbesserten Ökonomie zu interpretieren, wenn man nicht sicher sein kann, dass die anderen Messgrößen konstant sind. In diesem Sinne ist es auch schwer, die in der Literatur bekannten Aussagen zur Zykluslänge zu beurteilen, weil Sie nicht zwischen einer Verbesserung durch eine verbesserte Ökonomie oder eine Verbesserung durch erhöhte Leistungsfähigkeit unterscheiden. Saito (120) beobachtet z.B., dass die Zuglänge mit zunehmendem Alter zunimmt, aber es ist auch offensichtlich, dass dies sowohl durch eine höhere Leistungsfähigkeit als auch eine höhere Ökonomie bedingt sein könnte.

Wenn wir die Ergebnisse von 3.3.6 berücksichtigen, scheint es eher so zu sein, dass eine zu niedrige Frequenz auch keine optimale Leistung ermöglicht. Hier scheinen eher die moderaten Zyklusfrequenzen ökonomischer zu sein. Dies würde insgesamt darauf hindeuten, dass es sicherlich für den Einzelnen erstrebenswert ist, etwas höhere Zykluswege zu erreichen und diese im Training auch anzustreben, dass aber jeder einen für sich persönlich optimalen Frequenzbereich besitzt. Wenn dieser Frequenzbereich wesentlich unterschritten wird, scheint sich das jedoch negativ auf die Ökonomie auszuwirken.

Auch scheint es so zu sein, dass sich die besseren Schwimmer vor allem dadurch auszeichnen, dass sie in einem Rennen die Parameter Zuglänge und Zugfrequenz länger auf einem hohen Niveau halten können als die schlechteren Schwimmer (19) und auf diesem Wege höhere durchschnittliche Geschwindigkeiten erreichen. Aus diesem Beispiel wird aber auch deutlich, dass die Fähigkeit, eine höhere Zuglänge zu erreichen, alleine nicht ausreicht, denn erst die Fähigkeit, diese Zuglänge auch über längere Zeit durchzuhalten (d.h. die metabolische Grundlage), ermöglicht eine höhere Leistung. Es bleibt also weiterhin die Frage, ob durch eine höhere Zuglänge alleine eine höhere Ökonomie erreicht werden kann oder ob diese grundsätzlich auch einer höheren metabolischen Leistungsfähigkeit bedarf.

4.1.8 Graphischer Vergleich von Änderungen der Leistung, Herzfrequenz, Zyklusfrequenz und Laktat mit der Geschwindigkeit

Der graphische Vergleich soll verdeutlichen, wie sich die angegebenen Parameter mit der Geschwindigkeit verändern. Die Herzfrequenz steigt linear an, genauso wie die

Zyklusfrequenz, diese jedoch mit einer etwas größeren Steigung. Dies ist in Übereinstimmung mit Untersuchungen anderer Autoren, die ebenfalls einen linearen Anstieg der Herzfrequenz (60,62) beobachteten. Auch die Zyklusfrequenz steigt bekannter Maßen mit steigender Geschwindigkeit an (32,34,35). Der Anstieg ist relativ individuell und erreicht ein Maximum, nach dem eine weitere Erhöhung der Frequenz zu einem Geschwindigkeitsabfall führt (32,34,35). Die Laktatkurve hat eine Funktion der Form $y = a * e^{b*x}$ (101). Diese Funktion steigt mit steigender Geschwindigkeit am schnellsten an. Dies macht theoretisch auch Sinn, denn die Laktatwerte repräsentieren im Wesentlichen die Energiemengen, die über das dynamische Gleichgewicht zwischen Laktatbildung und –elimination hinaus erzeugt werden, während die basischen Puffermechanismen (Bikarbonat, Proteine) und Hyperventilation als Ausgleichsmechanismen erschöpft sind. Bei geringen Geschwindigkeiten besteht dieses Gleichgewicht, während sich bei hohen Geschwindigkeiten das Verhältnis zugunsten der Laktatbildung verschiebt. Der Netto-Effekt ist als Anstieg der Blutlaktatwerte messbar.

Die Bedeutung der Laktatanalyse und von Laktatleistungskurven wird auch weiterhin kontrovers diskutiert (21,22). Gegenüber anderen Parametern wie den Atemgasen oder Hormonen ist der Blutlaktatwert relativ einfach zu bestimmen und auch daher in der Leistungsdiagnostik beliebt. Es ist aber auch bekannt, dass die Einflussgrößen auf den Blutlaktatwert während einer Belastung sehr komplex sind. Neben metabolischen, ventilatorischen und cardiozirkulären Faktoren hat auch das Versuchsprotokoll (Belastungslänge, Belastungsanstieg, Pausen, Vorbelastung) (21,22) Einfluss auf die Höhe der gemessenen Laktatwerte. Man weiß außerdem, dass das Gleichgewicht von Laktatbildung und Elimination, welches zu vielen verschiedenen Schwellenkonzepten geführt hat, auch von Diffusionsraten und Pufferkapazitäten abhängt, welche nicht direkt mit der Belastung zusammenhängen (21). Dies führte unter anderem zu der Empfehlung,

wenn möglich auch andere Parameter zur Beurteilung heranzuziehen, namentlich Harnstoff, CK, respiratorische Quotienten, VO_{2max} und Herzfrequenzen (21). Die bekannten Schwellenkonzepte reichen von fixen aerob-anaeroben Schwellen (82) bis zu individuellen Schwellen (37), da relative schnell offensichtlich wurde, dass durchschnittliche maximale Blutlaktat steady states (max Lass) zwar um $4,0 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ auf dem Laufband und $4,3 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ auf dem Fahrradergometer liegen, individuelle Werte jedoch zwischen $2,3$ und $6,8 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ schwanken (52).

Im Bereich des DSV sind zwei verschiedene Konzepte der Laktatdiagnostik gebräuchlich (101,125,126,127), wobei die Laktatdiagnostik nach Pansold (101) in der offiziellen Leistungsdiagnostik der Deutschen Schwimmverbandes integriert ist. Grundsätzlich gilt aber auch für diese Konzepte, dass die multifaktoriellen Einflussgrößen eine Interpretation erheblich erschweren. Jahrelange Erfahrung hat es aber möglich gemacht, sinnvolle Interpretationen zu liefern, auch wenn die theoretische Grundlage nicht immer eindeutig ist.

Zusätzlich zu diesen Überlegungen soll deutlich werden, warum es so problematisch ist, alleine die Laktatleistungskurve zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit heranzuziehen. Die Laktatwerte können keine Auskunft darüber geben, wie viel Energie wirklich erzeugt wurde, allenfalls über den anaeroben Anteil. Je nachdem wie hoch die anaerobe Energieproduktion ist, leitet man daraus ab, ob die aerobe Leistungsfähigkeit des Organismus zu- oder abgenommen hat.

Die Leistungsabgabe steigt ebenfalls mit steigender Geschwindigkeit an. Dieser Anstieg erfolgt gemäß einer Funktion der Form: $y = a * x^{b+1}$, ähnlich wie z.B. von Toussaint beschrieben (136,137,138).

Der Korrelationskoeffizient dieser Funktion ist mit 0,998 größer als bei allen anderen gemessenen Parametern.

4.1.9 Vergleich der Messgrößen “Leistungsabgabe“ und “Laktat“ am Beispiel

Grundsätzlich würde man bei einem gezeigten Kurvenverlauf wie in Abbildung 6 von einer besseren Leistungsfähigkeit im ersten Test ausgehen (101,126,127). Bei gleicher Geschwindigkeit wird im ersten Test weniger Laktat (netto) gebildet als im zweiten Test.

Die Projektion für einen maximalen Laktatwert von 15 mmol/l würde im ersten Test eine maximale Geschwindigkeit von 1,82 m/s und im zweiten Test eine maximale Geschwindigkeit von 1,76 m/s ergeben.

Die Abbildung 7 zeigt dann, wie viel Energie wirklich verbraucht wird, um die jeweilige Geschwindigkeit zu erreichen. Jetzt wird der Vorteil der Messgröße Leistungsabgabe gegenüber den Laktatbildung deutlich. Die Laktatkurve gibt keine Auskunft darüber, wie viel Energie insgesamt bei einer gegebenen Geschwindigkeitsstufe wirklich verbraucht wird. Die Annahme ist, dass, wenn die Laktatakkumulation früher einsetzt, die aerobe Energiebereitstellung nicht so gut ist wie im Vergleichstest. Gemessen werden kann die aerobe Energiebereitstellung allerdings mit einem Laktattest nicht.

Aus diesem Grunde kann man die vorliegenden Messdaten auch nicht mit Literaturangaben vergleichen, da die genauen Energiemengen zum Erreichen von bestimmten Geschwindigkeiten mit den herkömmlichen Tests nicht gemessen werden.

Simon (127) erkennt allerdings, dass im anaeroben Teil der Belastung nicht nur metabolische Fähigkeiten, sondern auch technische Fähigkeiten gemessen werden, denn ein sehr steiler Anstieg der Geraden, die den ersten (submaximalen) Test mit dem zweiten

(maximalen) Test verbinden, deutet auf eine schlechte Bewegungsökonomie hin. Das Korrelat zu dieser Beobachtung ist bei Pansold (101) der Faktor b der Gleichung $y = a * e^{b*v}$, welcher, neben metabolischen Fähigkeiten, ebenfalls beschreibt wie ökonomisch Leistung in Vortrieb umgewandelt wird.

4.2 Mathematische Modelle der Leistungsabgabe

4.2.1 Individueller Verlauf der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit

Die graphische Darstellung (siehe Abbildung 8) der Messwerte macht deutlich, wie individuell unterschiedlich die Leistungsabgabe bei den einzelnen Geschwindigkeiten ist. Noch interessanter für eine Beurteilung ist es aber, auch die Änderungen mit steigender Geschwindigkeit zu beschreiben. Anstatt Personen nur bei einer bestimmten Geschwindigkeit miteinander zu vergleichen, sollte man den gesamten Kurvenverlauf berücksichtigen können.

Dieser unterschiedliche Kurvenverlauf ist nicht Ausdruck einer unterschiedlichen Leistungsfähigkeit in den einzelnen Geschwindigkeitsbereichen, sondern der unterschiedlichen Ökonomie in den einzelnen Geschwindigkeitsbereichen. Ökonomie ist also nicht eine für ein Individuum konstante Größe, sondern die Ökonomie ändert sich auch individuell mit der Geschwindigkeit.

Der Proband „J.Le.“ z.B. benötigt für niedrige Geschwindigkeiten sehr wenig Energie, ist hier also sehr ökonomisch. Im höheren Geschwindigkeitsbereich benötigt er jedoch im

Vergleich zu den anderen gezeigten Probanden sehr viel Energie, ist also im Verhältnis sehr unökonomisch.

Es ist uns nicht bekannt, dass andere Autoren explizit den individuellen Verlauf der Leistungsabgabe bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten beschrieben hätten. Dass ähnliche Phänomene jedoch auch von anderen Autoren beobachtet wurden, wird aus folgenden Aussagen deutlich. Es ist weiterhin strittig, ob der Wasserwiderstand von der Geschwindigkeit oder dem Quadrat der Geschwindigkeit abhängig ist (7,20,43,91,111), was ein Ausdruck dafür sein könnte, dass dies individuell und in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sehr unterschiedlich sein könnte und dass unterschiedliche Autoren daher unterschiedliche Ergebnisse (je nach Probandengut) erzielen können.

Am interessantesten scheint in diesem Zusammenhang eine Veröffentlichung von Toussaint (137), der den aktiven Wasserwiderstand (gemessen mit dem MAD-System) durch die Gleichung $F_d = A * v^b$ beschrieb (F_d = active drag (aktiver Wasserwiderstand); A = konstanter Widerstandsfaktor; v = Geschwindigkeit; b = variabler Faktor). Nach der bekannten Theorie, dass der aktive Wasserwiderstand proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist (7,20,43,91,111), würde man $b = 2$ erwarten, oder zumindest eine Annäherung. Es zeigt sich jedoch, dass der Faktor zwischen 1,67 und 2,83 bei dem gemessenen Probandengut variiert. Nimmt man $b = 2$ als konstant an (sozusagen als physikalisches Gesetz), bleibt nur die Erklärung, dass sich 'A' mit der Geschwindigkeit verändert. Im Schnitt steigt der Widerstandsfaktor mit steigender Geschwindigkeit an, aber es gibt auch Probanden bei denen der Faktor fällt. Die Autoren wussten keine eindeutige Erklärung für das ‚Phänomen‘, erkannten jedoch, dass es offensichtlich individuelle Veränderungen des Widerstandsfaktors mit der Geschwindigkeit geben müsste (137). Genau dies ist auch die Aussage, die sich aus den vorliegenden Messungen ergibt. Der Widerstandsfaktor verändert sich individuell mit der Geschwindigkeit und es gibt

nicht einen konstanten Faktor für alle Schwimmer, nicht einmal einen konstanten Faktor für ein Individuum.

Der Faktor 'b' von Toussaint (137) entspricht grundsätzlich dem von uns beschriebenen Faktor 'b', denn er leitet sich von den Überlegungen des Autors ab (137), aber ein direkter Vergleich ist leider nicht möglich, da das MAD-System nicht völlig mit dem freien Schwimmen zu vergleichen ist und die Schwimmer in dem beschriebenen Versuch nur Armarbeit geleistet haben. Als interessantes Detail wird jedoch erwähnt, dass die Person mit dem kleinsten Faktor 'b' ein Olympiasieger war, was unsere Beobachtungen unterstützt, dass die kleinsten Faktoren grundsätzlich mit den höchsten Wirkungsgraden und Leistungen zumindest bei sehr hohen Geschwindigkeiten korrelieren. In der vorliegenden Untersuchung hatten Sprinter einen signifikant kleineren Faktor 'b' und auch die besseren Schwimmer der Gruppe haben insgesamt kleinere Faktoren 'b' und 'A_{LBM}'.

4.2.2 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit

Es wird deutlich, dass die Funktion $y = A * v^{b+1}$, wie auch von anderen Autoren (136,137,138) beschrieben wurde, sehr exakt die Veränderung der metabolisch aufgewendeten Leistung mit steigender Geschwindigkeit beschreibt. Ein Korrelationskoeffizient von 0,998 ist außergewöhnlich und auch der durchschnittliche Korrelationskoeffizient aller individuell angepassten Kurven von 0,985 ist noch hervorragend.

In der Literatur sind viele verschiedene Modelle bekannt, die mit linearen oder Potenz-Funktionen die Leistungsabgabe einer bestimmten Geschwindigkeit zuordnen (25,57,64)

mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,87 und 0,99. Wichtig ist aber immer den beobachteten Geschwindigkeitsbereich mit zu berücksichtigen. Je kleiner dieser Bereich ist, desto höher liegt grundsätzlich der Korrelationskoeffizient. Die meisten der beschriebenen Untersuchungen, betrafen Geschwindigkeiten unter 1,3 m/s.

Es ist wichtig festzuhalten, dass die hier gewählte Funktion die tatsächliche Leistungsabgabe sehr gut beschreibt, so dass man in Zukunft den individuellen Verlauf durch diese Funktion als Ausdruck der tatsächlichen individuellen Unterschiede ansehen kann. Außerdem wurden bei der Berechnung sowohl die anaerob als auch aerob erzeugten Energiemengen berücksichtigt.

Die Vergleiche der Funktionen von verschiedenen Sportlern machen noch deutlicher wie sich die abgegebene Leistung mit steigender Geschwindigkeit ändert. Einige Sportler brauchen in den unteren Geschwindigkeitsbereichen relativ wenig Energie, aber bei steigender Geschwindigkeit steigt die Energieabgabe überproportional steil an. Der Exponent 'b' der Funktion ist also groß, wodurch die Kurve steiler wird.

Andere Sportler haben einen kleinen Exponenten 'b', was bedeutet, dass bei steigenden Geschwindigkeitsstufen die abgegebene Leistung nur langsam zunimmt. Wie bereits in vorherigen Kapiteln erwähnt, gibt es in der Literatur keine eindeutige Meinung zu der mathematischen Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Leistungsabgabe (7,20,43,91,111). Weitere beschriebene Zusammenhänge lauten z.B. $VO_2 = 16 + 15 \cdot v^{3,2}$ (Holmer,64), $VO_2 = 32,72 \cdot v^{1,42}$ (Madsen (nach Hollmann), 57) oder weitere Abwandlungen (57). Eine weitere Diskussion dieser Ergebnisse erscheint nicht nötig, denn die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass es eben keine Standardformel mit konstantem Faktor 'b' geben kann. Die Ergebnisse der vorgenannten Autoren widersprechen dem insofern nicht, als diese den Durchschnitt für 1. die gemessene Gruppe und 2. die gemessenen Geschwindigkeiten korrekt wiedergeben. Der Fortschritt dieser

Untersuchungen soll es sein, konstante individuelle Merkmale beschreiben zu können, deren Verlauf mit der Geschwindigkeit ebenfalls beschrieben werden kann.

4.2.3 Mathematisches Modell des individuellen Verlaufes der Leistungsabgabe in Relation zur LBM ('lean body mass')

Für die Leistungsdiagnostik ist es nicht nur wichtig, den Vergleich in der Entwicklung eines Individuums dokumentieren zu können, sondern auch von Interesse, die Unterschiede zwischen einzelnen Sportlern erfassen zu können. Aus diesem Grunde wird die Leistungsabgabe auf die 'lean body mass' (LBM) bezogen. Dies ermöglicht einen objektiven Vergleich, denn offensichtlich verbraucht ein schwererer und größerer Sportler mehr Sauerstoff und Energie als ein leichter und kleiner, was in der Physiologie zu der Unterscheidung von absoluter und relativer Sauerstoffaufnahme führte (57,114). Entscheidend für den höheren Energieverbrauch eines größeren Sportlers ist die größere aktive Muskelmasse, die eindeutig stärker mit der fettfreien Körpermasse korreliert als mit dem gesamten Körpergewicht, da dieses auch das Fettgewebe mit einschließt, welches nicht zur Erzeugung von nutzbarer Leistung beiträgt. Man unterscheidet also zwischen relativem und absolutem Energieverbrauch (71). Die fettfreie Körpermasse (LBM) ist der Korrekturfaktor für die Muskelmasse eines Athleten.

In der Literatur ist sowohl der Bezug auf das Körpergewicht (57,77), als auch auf die fettfreie Körpermasse (95) bekannt. Das Körpergewicht hat den pragmatischen Vorteil, dass es einfach zu messen ist und bei sehr homogenen Populationen sehr ähnlich ist und somit keinen erheblichen Fehler verursacht. Die fettfreie Körpermasse ist zwar umständlicher zu ermitteln, im physiologischen Sinne jedoch als überlegen anzusehen.

Costill (25) zeigte, dass die Korrelation der Transportkosten (energy cost) mit der fettfreien Körpermasse größer ist als mit dem reinen Körpergewicht. Die Interpretation ist, dass die fettfreie Körpermasse präziser die stoffwechselaktive Körpermasse (Muskulatur) beschreibt und daher eine höhere Korrelation mit der Leistungsabgabe aufweist (25,95).

Im Schwimmen wird als Bezugsmaß für aktive Wasserwiderstände oft die größte frontale Körperfläche (biggest cross-sectional area) benutzt (69,137). Die Vorstellung war ursprünglich, dass diese größte frontale Körperfläche den Widerstand wesentlich beeinflusst und der Korrelationskoeffizient zwischen größter frontaler Fläche und aktivem Wasserwiderstand war mit $r = 0,87$ auch sehr hoch (69). Im modernen Freistilschwimmen ist es aber zweifellos so, dass besonders bei hohen Geschwindigkeiten nur ein Teil des Körpers überhaupt ständig Wasserberührung hat. Der Kopf ist zumindest zu großen Teilen über der Wasseroberfläche und teilweise ist sogar der gesamte Rücken über der Wasseroberfläche zu sehen. Auch ist nicht genau ersichtlich, wie die Schultern in die Berechnung der größten frontalen Fläche eingehen sollen, denn diese sind im Schwimmen ständig in Bewegung, mal über und mal unter der Wasseroberfläche.

Es soll damit nicht die hohe Korrelation zwischen aktivem Wasserwiderstand und der größten Frontfläche in Frage gestellt werden, aber diese hohe Korrelation könnte auch ein Ausdruck für die hohe Korrelation von aktivem Wasserwiderstand und den Körperausmaßen im Allgemeinen sein. Sowohl Huijing als auch Toussaint (69,137) bestätigen diese Korrelation ($r = 0,87$). Eine andere Untersuchung von Toussaint (143) zeigt, dass Kinder, deren größte Frontfläche im Wachstum im Schnitt um 16% zunahm, keine Zunahme des Wasserwiderstandes verzeichneten. Es wurde vermutet, dass durch eine Verbesserung der Strömungsverhältnisse eines längeren Körpers die größere Frontfläche ausgeglichen wurde (143).

Wenn man die Kurvenverläufe in Abbildung 10 und 11 vergleicht, fällt auf, dass sich die Kurven im Verhältnis zueinander zwar verschieben, der Verlauf (die Steigung) der Kurven jedoch unverändert bleibt. Der Faktor 'b' verändert sich durch den Bezug auf die fettfreie Körpermasse nicht, allein der Faktor A verändert sich. Diese Beobachtung könnte wichtig sein, wenn man die Faktoren 'A' und 'b' zu interpretieren versucht. 'A' ist offensichtlich ein Merkmal, welches mit den Körperausmaßen zusammenhängt, während 'b' unabhängig von den Körperausmaßen ist. Genauere Überlegungen, was die Faktoren 'A' und 'b' beschreiben, folgen in einem späteren Abschnitt.

4.2.4 Faktoren A_{LBM} und 'b' im Vergleich

Von entscheidender Bedeutung für weitere Überlegungen ist, wie sich die Faktoren vom ersten zum zweiten Test verändern. In der Annahme, dass sich die technischen Fähigkeiten innerhalb des maximalen Testabstandes von 7 Tagen nicht wesentlich verändern, sollte man relativ konstante Faktoren für den ersten und zweiten Test erwarten.

Es gibt andererseits ohne Frage auch individuelle technische Veränderungen innerhalb von Tagen und sogar innerhalb einer Trainingseinheit, so dass wir nie ganz konstante Werte erwarten können. Diese unterschiedlichen technischen Ausführungen sind sicherlich auch während der durchgeführten Messungen aufgetreten, zumindest deuten visuelle Kriterien, z.B. ein veränderter Beinschlag bei einzelnen Sportlern darauf hin. Diese nicht konstanten Technikausführungen von einzelnen Schwimmern werden sich aber nie ganz ausschließen lassen, können aber erklären, warum die später beschriebenen Merkmale bei einzelnen Sportlern nicht konstant sind.

Insgesamt war es aber ein Ziel, den Test so zu gestalten, dass sich die Art des vorherigen Trainings nicht entscheidend auf das Maß für die technischen Fähigkeiten auswirkt, denn sonst könnte die Technik jedes Mal nur nach einem vorher genormten Training beurteilt werden. Es wurde bewusst keine Einschränkungen bezüglich des vorhergehenden Trainings gemacht, um nicht die kleinsten täglichen Schwankungen in der Technik mit zu erfassen, sondern primär die konstante Fähigkeit zu messen, sich im Wasser ökonomisch fortzubewegen.

Es fällt auf, dass sich die Wertepaare der Faktoren (siehe Tabelle 9 und Abbildung 12) zwischen erstem und zweitem Test teilweise erheblich unterscheiden. Die Faktoren einzeln gesehen sind also kein konstantes Merkmal der Technik, wie man gemäß den obigen Überlegungen erwarten könnte.

Die Ausgleichsgerade der Punktwolke (siehe Abbildung 12) hat die Form:

$$A_{LBM} = 11,23 - 2,07 * b.$$

Wenn man die Werte des ersten und zweiten Tests jedes Sportlers miteinander verbindet, erkennt man, dass diese Geraden fast alle parallel zur Ausgleichsgeraden verlaufen oder sehr dicht beieinander liegen. Diese Parallelität bedeutet, dass die beiden Faktoren voneinander abhängig sind, denn die Veränderung im Verhältnis zueinander hat System. Wenn 'A_{LBM}' größer wird, wird 'b' kleiner und umgekehrt.

Um diese Tatsache mathematisch zu beschreiben, haben wurde ein Technikindex Z_T definiert, der die Faktoren 'A_{LBM}' und 'b' kombiniert. Dieser Index beschreibt mathematisch, wie weit entfernt sich die Gerade jedes Einzelnen von der Ausgleichsgeraden befindet.

Offensichtlich ist eine Veränderung der Faktoren parallel zur Ausgleichsgeraden nicht ungewöhnlich, während eine Veränderung im Abstand zur Ausgleichsgeraden sehr ungewöhnlich ist. Ein Test auf Unterschiede im Technik-Index (Z_T) zwischen 1. und 2.

Test erreichte annähernd Signifikanzniveau ($p=0,05$), so dass man mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgehen kann, dass die Unterschiede zwischen dem ersten und zweiten Test gering sind.

Veränderungen (im Abstand zur Ausgleichsgeraden) kommen auch vor, aber sind sehr wahrscheinlich eher Ausdruck einer veränderten Technik von einem Test zum anderen. Diese These ist im Nachhinein schwer zu überprüfen, Hinweise sind jedoch, dass sich physiologische Parameter wie Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz deutlich unterscheiden. Die betroffenen Individuen weisen außerdem starke Veränderungen von Zyklusfrequenzen und Art des Beinschlages von einem Test zum anderen auf und sowohl die subjektive Einschätzung der Schwimmer selbst, als auch die Einschätzung des Trainers deuten darauf hin, dass die Technik in diesen Fällen nicht konstant war.

Der Technikindex, als Kombination der beiden Faktoren, kann also als das gesuchte konstante Merkmal, welches sich von einem Test zum anderen nicht wesentlich verändert, interpretiert werden.

Für den Kurvenverlauf einzelner Individuen würde dies bedeuten, dass die Kurve einmal eine geringere Steigung haben kann und dafür einen höheren Ordinaten-Schnittpunkt hat oder umgekehrt. Das würde bedeuten, dass man an einigen Tagen höhere Geschwindigkeiten im Training erreichen kann und einem dafür niedrige Geschwindigkeiten im Verhältnis zu einem anderen Tag schwerer fallen und umgekehrt. Diese theoretische Überlegung deckt sich auch völlig mit der Realität, denn an manchen Tagen erreicht man trotz gleicher oder besserer metabolischer Leistungsfähigkeit (z.B. nach einem freien Tag) nicht die Geschwindigkeiten der vorhergehenden Tage.

Der Technikindex dagegen scheint ein konstantes Merkmal zu sein, welches sich nicht innerhalb von kurzer Zeit ändert.

Die Kurven der besseren Schwimmer liegen in der graphischen Darstellung unterhalb derer von schlechteren Schwimmern. Als Variante kann dieser Unterschied auch erst bei höheren Geschwindigkeiten deutlich werden, was der Fall ist, wenn vor allem der Faktor 'b' sehr klein ist. Eine Verbesserung der Technik z.B. nach einem gezielten Training würde sich als eine Verschiebung der Kurve nach unten und/oder Abflachung bei höheren Geschwindigkeiten zeigen. Eine Verschlechterung der Technik hätte den gegenteiligen Effekt.

4.2.5 Vergleich des Technik-Indexes Z_T mit A_{LBM} und 'b'

Der Index Z_T hat also zwei Vorteile, erstens kombiniert er die beiden Faktoren A_{LBM} und 'b' zu einem einzigen Faktor und zweitens ist er ein konstanteres Merkmal als einer der beiden anderen Faktoren alleine.

Da sich die Technik kurzfristig nicht erheblich ändern wird, erwarten wir, dass der Technikindex bei zwei verschiedenen Tests relativ ähnlich ist. Dies ist offensichtlich auch der Fall, was graphisch am anschaulichsten durch die Parallelität der Geraden beschrieben wird.

Wenn man den relativen Fehler von Technikindex, A_{LBM} und 'b' betrachtet, ist dieser wiederum für den Technikindex am geringsten, was diesen wiederum als das konstanteste Merkmal bestätigt.

4.2.6 Theoretische Grundlagen

Die folgenden Theorien sind aus der Literatur bekannt. Der aktive Wasserwiderstand (F_d) setzt sich genau genommen aus drei Komponenten zusammen: Kraftwiderstand (pressure drag), Reibungswiderstand (friction drag) und Oberflächenwiderstand (wavemaking resistance) (2,20,91,137). Der Kraftwiderstand ist bei den vorherrschenden hohen Reynolds Zahlen von $2,10^6$ bis $3,10^6$ dominierend und wird durch folgende Formel beschrieben: $F_d = C_d A_p 0,5 \rho v^2$ (20).

C_d repräsentiert dabei den Widerstands-Koeffizienten, A_p die größte Frontfläche, ρ die Wasserdichte und v die Schwimmggeschwindigkeit. Der aktive Wasserwiderstand scheint also vom Quadrat der Schwimmggeschwindigkeit abzuhängen, dies trifft zumindest für geometrische Körper wie Zylinder und Kugeln bei Reynoldschen Zahlen unter 10^5 zu, bei denen C_d konstant ist. Bei Reynoldschen Zahlen zwischen 10^5 und 10^6 , welche bei höheren Geschwindigkeiten auftreten, wird C_d jedoch ständig kleiner. Würde dieses Phänomen bei Geschwindigkeiten, wie sie von Schwimmern erreicht werden, auftreten, muss damit gerechnet werden, dass der Quotient F_d/v^2 mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. In der Literatur sind beide Möglichkeiten, 1. der Quotient F_d/v^2 ist relativ konstant und 2. der Quotient F_d/v^2 nimmt mit steigender Geschwindigkeit ab, bekannt, aber keine Theorie hat sich bis jetzt eindeutig durchgesetzt.

Die vorliegenden Messungen zeigen eine Beziehung der folgenden Form ergeben:

$$F_d = A \cdot v^b$$

Wenn man diese Funktion jedoch anders schreibt, erkennt man, dass sie grundsätzlich den bekannten Funktionen entspricht. Ersetzt man den Faktor 'A' gemäß $A = C_d A_p 0,5 \rho$, ergibt sich $F_d = C_d A_p 0,5 \rho v^b$. Der Faktor 'A' ist also das Produkt aus Widerstands-Koeffizient,

größter Frontfläche, einer Konstanten und der Wasserdichte. Um an der Theorie festzuhalten, dass der Wasserwiderstand grundsätzlich vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängig ist, kann man die Funktion weiter zu $F_d = (C_d A_p \cdot 5 \rho v^{b-2}) v^2$ umschreiben. Wir definieren dann einen Faktor 'A₁' gemäß $A_1 = C_d A_p \cdot 5 \rho v^{b-2}$. Um die These zu testen, ob der Quotient $F_d/v^2 = A_1$ wirklich konstant ist, müssen wir nur den Faktor 'b' betrachten, denn alle anderen Faktoren die A₁ bestimmen sind konstant.

Wie man aus Tabelle 9 erkennen kann, nimmt 'b' jedoch Werte zwischen 0,40 und 2,19 bei einem Mittelwert von 1,34 an und nicht den Wert 2, der nötig wäre, um den Faktor 'A₁' konstant zu halten. Ähnliche Beobachtungen machte Toussaint (137). Der Faktor 'A₁' gemäß $A_1 = A \cdot v^{b-2}$ nimmt bei den beobachteten Probanden individuell mehr oder weniger mit steigender Geschwindigkeit zu, bei einigen Probanden jedoch auch ab (siehe auch Toussaint (137)).

Bis jetzt ist der Faktor A_p, die größte Frontfläche, nicht genauer betrachtet worden. Die bekannten Theorien gehen davon aus, dass dieser Wert auch konstant ist, was bei einem sich bewegenden Objekt nicht unbedingt selbstverständlich ist. Es ist aber offensichtlich, dass dieser Faktor für die 'Größe' des Objektes korrigiert, weil größere Objekte offensichtlich mehr Widerstand erzeugen. In der vorliegenden Studie wurde keine größte Frontfläche gemessen und es wurde daher mit dem Maß korrigiert, das die höchste Korrelation zum Faktor 'A' hat, nämlich der LBM. Es ergibt sich folgende Beziehung:

$$F_d/(v^2 \cdot LBM) = A/LBM \cdot v^{b-2}$$

Auf der rechten Seite der Gleichung stehen jetzt alle Faktoren, die den individuellen Wasserwiderstand bestimmen, korrigiert um die LBM, so dass auch unterschiedlich große Individuen verglichen werden können.

Man hat jetzt nicht den aktiven Wasserwiderstand ermittelt, da z.B. die größte Frontfläche nicht bekannt ist, aber man kennt die beiden individuellen Faktoren, die neben der 'Größe' den Wasserwiderstand beeinflussen. Diese Faktoren A_{LBM} ($A_{LBM}=A/LBM$) und 'b' erlauben also theoretisch eine Aussage darüber, wie widerstandsarm oder -reich sich die schwimmenden Körper im Wasser verhalten.

4.2.7 Theoretische Zusammenhänge

Di Prampero etablierte als erster den Begriff 'Transportkosten' (111). Die Transportkosten, mittlerweile auch von anderen Autoren untersucht (55,62,108), sind die Menge Sauerstoff, die gebraucht wird, um 1 Meter im Wasser zurückzulegen ($\text{ml O}_2 \cdot \text{m}^{-1}$). Der Sauerstoffverbrauch steht dabei als Äquivalent für Energie (oder auch Arbeit). 1ml Sauerstoff ergibt dabei ungefähr 20J Energie. Da Kraft mal Weg Arbeit ist ($F \cdot s = W$) ($W = \text{Work}$), ist Arbeit pro Weg eine Kraft ($W/s = F$). Der Sauerstoffverbrauch pro Wegstrecke hat also die Dimension einer Kraft. Diese Kraft ist nichts anderes als der aktive Wasserwiderstand, der über einen metabolischen Ansatz bestimmt wurde. Di Prampero (111) zeigt außerdem durch Umstellen der Gleichung, dass die Schwimmgeschwindigkeit gleich der Netto-Eingangsleistung multipliziert mit dem Schwimm-Wirkungsgrad dividiert durch den aktiven Wasserwiderstand ist ($v = P_{\text{net-in}} \cdot (e_s / F_d)$). Es folgt also, dass $P_{\text{net-in}} / v = F_d / e_s$ bzw.

$W / m = F_d / e_s$. Die Transportkosten sind also gleich dem aktiven Wasserwiderstand pro Schwimm-Wirkungsgrad.

Der Ansatz von Toussaint und später auch anderen Autoren (50,68,71,138,139,141) war, dass der Schwimmwirkungsgrad gleich dem Quotienten aus der Kraft, die zur

Überwindung des Wasserwiderstandes notwendig ist ($=$ aktiver Wasserwiderstand), multipliziert mit der Geschwindigkeit im Verhältnis zur Netto-Eingangsleistung ist ($e_s = F_d * v / P_{\text{net-in}}$). Man erkennt sofort, dass die Aussage die gleiche ist. Der Ansatz von Toussaint geht aber über eine Kraftmessung (MAD-System). Er bestimmt die Kraft direkt und kann daher den Schwimm-Wirkungsgrad genau beziffern (138,139,141).

Schon Di Prampero (111) war aber der Ansicht, dass es nicht unbedingt notwendig ist, die genaue Größe des Schwimm-Wirkungsgrades oder des aktiven Wasserwiderstandes zu kennen, sondern vielmehr das Verhältnis der beiden zueinander: $F_d / e_s = P_{\text{net-in}} / v$.

$P_{\text{net-in}} / v$ entspricht aber wiederum genau dem, was wir mit $A_{\text{LBM}} * v^b$ beschreiben. Die insgesamt erzeugte metabolische Leistung ist $P_{\text{net-in}} = A_{\text{LBM}} * v^{b+1}$, also ist

$P_{\text{net-in}} / v = A_{\text{LBM}} * v^b$. Unser mathematisches Model beschreibt also genau diesen Quotienten von aktivem Wasserwiderstand zum Schwimm-Wirkungsgrad.

Die Verbesserung liegt darin, dass wir erstens die relative Sauerstoffaufnahme zur Berechnung verwenden, so dass auch unterschiedlich schwere Individuen miteinander verglichen werden können, zweitens sich die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass sich dieser Quotient sehr wohl mit der Geschwindigkeit ändert (zumindest bei Geschwindigkeiten über 1,0 m/s) und wir drittens einen sehr individuellen Verlauf des Quotienten mit den Faktoren 'A_{LBM}' und 'b' beschreiben können.

Diese Überlegungen sollen zeigen, dass alle Autoren im Grunde den gleichen Sachverhalt beschreiben. Der wesentliche Fortschritt der vorliegenden Arbeit liegt darin, dass wir sehr individuell den Quotienten von aktivem Wasserwiderstand zu Schwimm-Wirkungsgrad beschreiben können, so dass man diese Parameter für eine Leistungsdiagnostik nutzen kann. Der zweite Vorteil ist, dass nicht mehr jede einzelne Geschwindigkeitsstufe separat miteinander verglichen werden muss, weil sich der Quotient geschwindigkeitsabhängig ändert (genauso wie auch die einzelnen Faktoren aktiver Wasserwiderstand und Schwimm-

Wirkungsgrad), so dass die beiden Faktoren A_{LBM} und b den gesamten Geschwindigkeitsbereich für ein Individuum beschreiben.

4.3 Analyse der Faktoren A_{LBM} , b und Z_T

4.3.1 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für Sprinter, Mittel- und Langstreckler

Bei der Unterteilung in Sprinter, Mittel- und Langstreckler fallen keine großen Unterschiede der einzelnen Faktoren, insbesondere keine großen Unterschiede im Index Z_T , auf. Das bedeutet aber auch, dass der Index Z_T ein insofern neutrales Merkmal ist, dass es nicht Sprinter, Mittel- oder Langstreckler in der Beurteilung bevorteilt. Caepfert (9,10) berichtet von Unterschieden im Antriebswirkungsgrad (propelling efficiency) von 48% für Sprinter, 56% für Mittelstreckler und 62% für Langstreckenschwimmer. Wenn man davon ausgeht, dass der mechanische Wirkungsgrad für alle Schwimmer gleich ist (15,142) würde dieses bedeuten, dass es erhebliche Unterschiede im Schwimmwirkungsgrad und somit der Technik zwischen Sprintern, Mittel- und Langstrecklern gibt. Dies ist sehr unwahrscheinlich und die Erklärung für die Messungen von Caepfert (9,10) könnte sein, dass bei den gemessenen Geschwindigkeiten (niedrige Geschwindigkeiten zwischen 1,0-1,4 m/s) die Langstreckler einen besseren Antriebswirkungsgrad aufweisen als zum Beispiel die Sprinter. Diese Unterschiede je nach Geschwindigkeit, bei der die Messungen durchgeführt wurden, werden mit dem Technikindex (Z_T) vermieden, denn dieser beschreibt durch den individuellen Kurvenverlauf gerade die Veränderung mit der

Geschwindigkeit. Einschränkend muss aber auch hier gesagt werden, dass die Ergebnisse erstmalig nur für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich gültig sind.

Es fällt auf, dass der Faktor 'b' tendenziell vom Sprinter zum Mittel- und zum Langstreckler zunimmt. Die Unterschiede sind allerdings nicht signifikant. Diese Entwicklung macht theoretisch Sinn, da ein kleiner Faktor 'b' eine geringere Steigung der Kurve im oberen Geschwindigkeitsbereich beschreibt, während ein großer Faktor 'b' von einem steilen Verlauf gekennzeichnet ist. Für einen Sprinter sind diese hohen Geschwindigkeitsbereiche von großer Bedeutung, da er hier die Wettkampfgeschwindigkeit erreicht. Für einen Langstreckler ist es nicht von großer Bedeutung, ob er bei sehr hohen Geschwindigkeitsbereichen noch ökonomisch schwimmt, denn er muss eher bei 'moderaten' Geschwindigkeiten längere Zeit schwimmen können.

Umgekehrt kann es natürlich auch so sein, dass die Fähigkeit, auch in höheren Geschwindigkeitsbereichen noch ökonomisch zu schwimmen, den Sprinter ausmacht und sich der Langstreckler schon sehr früh in seiner Entwicklung auf lange Strecken spezialisiert, weil er merkt, dass er hohe Geschwindigkeiten nur sehr unökonomisch schwimmen kann.

Insgesamt wäre für ein eindeutiges Ergebnis eine noch höhere Fallzahl notwendig. In der vorliegenden Untersuchung waren die Unterschiede in der Punktezahl zwischen den einzelnen Strecken (100m, 200m oder 400m) nur sehr gering, im Extremfall nur ein einziger Punkt, so dass die Unterscheidung in Sprinter, Mittel- oder Langstreckler zwar theoretisch, aber nicht praktisch eindeutig war.

Aus der Literatur sind keine Daten bekannt, die Unterschiede im Wasserwiderstand zwischen Sprintern, Mittel- und Langstrecklern beschreiben. Die Ergebnisse von Caepfert (9,10) beziehen sich auf den Antriebswirkungsgrad (propelling efficiency), der als gutes Maß für technische Fähigkeiten angesehen wird (50,71,142). Es ist, wie bereits

vorhergehend diskutiert, fraglich, ob die beschriebenen Unterschiede im Antriebswirkungsgrad zwischen Sprintern, Mittel- und Langstrecklern die tatsächlichen technischen Fähigkeiten widerspiegeln oder nur einen Zustand für einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich.

4.3.2 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für männliche und weibliche Schwimmer

Männliche Schwimmer weisen einen kleineren Faktor 'b' auf, wobei sie im Verhältnis auch etwas mehr Sprinter in ihrer Gruppe haben. Trotzdem ist der Unterschied noch sehr signifikant ($p < 0,01$). Der Faktor ' A_{LBM} ' ist dafür bei Männern größer (ohne signifikante Unterschiede), während der Index ' Z_T ' für beide Geschlechter sehr ähnlich ist.

Eine Erklärung könnte sein, dass Frauen absolut gesehen nicht so hohe Geschwindigkeiten erreichen wie Männer. Die beste 'Strategie' für einen Frauenkörper könnte es daher sein, mit einem grundsätzlich strömungsgünstigen 'Körper' in niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereichen ökonomisch zu sein, ohne speziell an sehr hohe Geschwindigkeiten angepasst zu sein.

Toussaint (137) beschreibt einen Widerstandsfaktor, der mit dem von uns beschriebenen Faktor ' A_{LBM} ' verwandt ist, und beobachtet Werte, die für Frauen etwa 20% niedriger sind als für Männer. Dieser Widerstandsfaktor ist jedoch ein absolutes Maß und nicht an die Körperdimensionen angepasst, so dass letztendlich ein genauer Vergleich nicht möglich ist. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass Frauen mit einem bekannt höheren durchschnittlichen Körperfettanteil bei niedrigen Geschwindigkeiten durch einen höheren Auftrieb ohne großen Energieaufwand eine günstigere Strömungsposition erreichen können. Dies würde sich als niedriger Faktor ' A_{LBM} ' zeigen, während ein höherer

Körperfettanteil bei höheren Geschwindigkeiten wahrscheinlich eher hinderlich wäre, weil der Auftrieb und die günstige Wasserlage weniger durch einen hohen Körperfettanteil als durch die Geschwindigkeit beeinflusst werden. Bei höheren Geschwindigkeiten wirkt sich eine größere Körpermasse wahrscheinlich eher negativ auf die maximal erreichbare Geschwindigkeit aus, weil eine höhere Körpermasse beschleunigt werden muss, diese sich aber nicht mehr positiv auf die Wasserlage auswirkt. Stager (133) konnte z.B. zeigen, dass weibliche Schwimmer mit dem geringeren prozentualen Körperfettanteil in einem 100m Rennen schneller waren als solche mit höheren Körperfettanteilen. Cordain (23) konnte mit Versuchen zu Nassanzügen (wetsuits) zeigen, dass diese den Auftrieb verbessern und zu Verbesserungen der Schwimmleistungen über 400m und 1500m führen. Von diesem Effekt profitierten aber nur die Probanden mit geringerem Körperfettanteil, was darauf hindeutet, dass eine bessere Körperlage, wie sie z.B. durch einen höheren Körperfettanteil verursacht wird, vor allem bei geringeren Geschwindigkeiten vorteilhaft ist.

Ein weiterer Grund für ungünstigere ökonomische Verhältnisse bei männlichen Schwimmern wurde von Gagnon (45) im höheren Drehmoment der Beine im Verhältnis zum Rumpf gesehen, das heißt die Beine der männlichen Schwimmer sinken stärker, bringen den Körper in eine ungünstigere Schwimmposition und verursachen so höhere Energiekosten für den Vortrieb. Diese Erklärung würde unsere Argumentation unterstützen, dass der weibliche Körper besonders im niedrigen Geschwindigkeitsbereich Vorteile in der Ökonomie haben könnte, denn im höheren Geschwindigkeitsbereich spielt das Drehmoment der Beine für die Körperlage praktische keine Rolle mehr. Daten von Montpetit (93) zeigen, dass Transportkosten pro kg Körpergewicht für männliche und weibliche Hochleistungsschwimmer nicht unterschiedlich sind, und macht gleichzeitig deutlich, dass es wichtig ist, die Größe (Körperdimensionen) der Probanden mit zu berücksichtigen.

4.3.3 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Art des Beinschlages

Die Art des Beinschlages scheint sich nicht entscheidend auf die Faktoren A_{LBM} , b oder Z_T auszuwirken.

Chatard (17,18) beschreibt, dass die Transportkosten für Schwimmer mit 6er Beinschlag höher sind als die für Schwimmer mit 2er Beinschlag. Dies mag daran liegen, dass nur bei Geschwindigkeiten zwischen 1,1 und 1,4 m/s getestet wurde, so dass die Schwimmer mit 6er Beinschlag einen für sie optimalen Geschwindigkeitsbereich nie erreichten. Unsere Untersuchungen würden diese Beobachtung tendenziell unterstützen, denn Schwimmer mit 2er Beinschlag haben einen tendenziell kleineren Faktor ' A_{LBM} ' und größeren Faktor ' b ', würden also bei geringeren Geschwindigkeiten tendenziell geringere Transportkosten haben. Für Schwimmer mit 6er Beinschlag gilt genau der umgekehrte Fall, dass sie nämlich bei geringen Geschwindigkeiten höhere Transportkosten hätten. Dieses Beispiel zeigt deutlich eine Schwäche des Konzeptes 'Transportkosten', denn man kann nicht davon ausgehen, dass ein Proband grundsätzlich unökonomischer schwimmt als ein anderer. Diese Aussage kann immer nur für die gemessene Geschwindigkeit gelten.

In der Literatur hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass der Beinschlag nicht so sehr direkt zum Vortrieb beiträgt, sondern vielmehr die Körperposition im Wasser zu stabilisiert (29,56,62). Die Notwendigkeit zur Stabilisation könnte individuell unterschiedlich sein, ohne dass dabei der eine oder andere Beinschlag an sich als technisch vorteilhafter oder ökonomischer gelten könnte. Die von allen Autoren (17,18,29,56,62) bis jetzt vertretene Ansicht, dass Langstreckler grundsätzlich mit dem ökonomischeren 2er Beinschlag schwimmen, könnte sich als nicht mehr zeitgemäß erweisen, denn immer mehr international erfolgreiche Mittel- und Langstreckler (Hacket, Brembilla, Perkins, Thorpe)

schwimmen ständig mit einem 6er Beinschlag, ohne dass es dazu schon wissenschaftlich Veröffentlichungen gäbe.

4.3.4 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Alter

Die Faktoren sind durchgängig für die älteren Sportler besser, wobei der Unterschied im Technikindex (Z_T) signifikant ist ($p < 0,05$). Die älteren Sportler sind in diesem Fall aber auch die deutlich besseren Schwimmer in der Einteilung nach FINA-Punkten.

Die Unterschiede könnten also vielmehr ein Hinweis darauf sein, dass mit 18 Jahren oder älter nur noch die Sportler auf diesem nationalen Niveau ihren Sport betreiben, die auch talentiert sind und Erfolg haben, d.h. solche, die schon immer eine gute Technik gehabt haben. Das Alter würde dann nur mit den Faktoren korrelieren, ohne direkten kausalen Zusammenhang.

4.3.5 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T getrennt nach Leistungsklassen

Die Unterschiede der einzelnen Faktoren getrennt nach Leistungsklassen sind sicherlich einige der interessantesten Ergebnisse dieser Studie. Die besseren Sportler weisen eindeutig den besseren Index Z_T und auch den besseren Faktor A_{LBM} auf. Die Unterschiede zeigen sich am eindeutigsten beim Index Z_T . Die Signifikanzniveaus können der Tabelle 15 entnommen werden.

Der Faktor 'b' unterscheidet sich nur sehr wenig zwischen den einzelnen Gruppen, ohne eindeutigen Trend. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Steigung der

Leistungskurven im höheren Geschwindigkeitsbereich (die der Faktor 'b' ja beschreibt) nicht gute und schlechte Schwimmer unterscheidet, sondern vielleicht eher den Unterschied zwischen einem Sprinter oder Langstreckler beschreibt (siehe 4.3.1).

Der Korrelationskoeffizient für die Korrelation zwischen Index Z_T und Leistung nach der FINA-Tabelle beträgt $r = -0,68$ ($p < 0,05$). Das bedeutet, dass ein großer Teil (47% der Varianz) der Leistungsunterschiede durch den Index Z_T zu erklären ist. Diese Tatsache ist deshalb so erstaunlich, weil der Index Z_T nur eine Aussage über die technischen Fähigkeiten macht. Die maximale Leistungsfähigkeit im physiologischen Sinne wurde dabei gar nicht berücksichtigt.

Dieses Ergebnis zeigt also, dass eine gute Technik die Leistungsfähigkeit wesentlich beeinflusst, wenn nicht sogar ihr größter Faktor ist. In diesem Zusammenhang ist es interessant zu wissen, dass in anderen Sportarten (Laufen, Radfahren) die Wettkampfleistung zu einem sehr hohen Grad mit der maximalen Sauerstoffaufnahme korreliert (57), während im Schwimmen die Korrelation sehr gering ist (25,127). Costill konnte (25) zeigen, dass die Korrelation von maximaler Sauerstoffaufnahme und der Schwimmzeit in einem maximalen 365,8m Schwimmtest nur $r = 0,43$ betrug, während z.B. die Zuglänge eine Korrelation von $r = 0,88$ aufwies. In einer Gruppe von Freizeitschwimmern mit einer durchschnittlichen maximalen Geschwindigkeiten von 0,89 m/s und einer Gruppe von Leistungsschwimmern mit einer maximalen Geschwindigkeit von 1,29 m/s war die maximale Sauerstoffaufnahme nicht unterschiedlich, nämlich 4,04 l/min (Freizeitschwimmer) und 4,00 l/min (Leistungsschwimmer) (25).

Eine lineare Regression zwischen der FINA-Punkteleistung als abhängiger Variable und dem Technikindex (Z_T) als unabhängiger Variable, ergibt ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,47$. Der Technikindex erklärt somit 47% der Varianz in der FINA-Punkteleistung. Kein anderer der in dieser Studie gemessenen Parameter hat einen annähernd so großen

Einfluss auf die FINA-Punkteleistung und die zusätzliche Berücksichtigung der anderen Parameter verbessert den Vorhersagewert nicht deutlich über 50%.

47% scheint auf den ersten Blick gering. Wenn man allerdings bedenkt, wie viele andere Faktoren die Wettkampfleistung beeinflussen, einschließlich der maximalen Kapazität der Energiebereitstellung, psychologische Einflüsse, Renntaktik, hormonale Regelmechanismen (25,79,102) und Ernährung, sind 47% sicherlich ein großer Anteil. Die maximale Sauerstoffaufnahme, die ja als das Brutto-Kriterium der aeroben Leistungsfähigkeit angesehen wird, erreicht als Vergleich nur einen Vorhersagewert von 18% für eine maximal Leistung über 365,8m (25) in einer Untersuchung von Costill.

Die bekannte Literatur beschreibt die große Bedeutung der Technik für die Leistung ausreichend (62,108,111). Toussaint (135) erkannte schon früh die hohe Korrelation von technischen Merkmalen mit dem Antriebswirkungsgrad (propelling efficiency) und betrachtete den Antriebswirkungsgrad als Maß für die technischen Fähigkeiten. Caepert (9,10) fand deutliche Unterschiede im Antriebswirkungsgrad zwischen Sprintern, Mittel- und Langstrecklern (48%, 56% und 62%). Diese Beobachtung erscheint nicht plausibel, denn es würde bedeuten, dass Langstreckler grundsätzlich eine bessere Technik haben als Sprinter. Es scheint eher wahrscheinlich, dass bei geringen Geschwindigkeiten getestet wurde, bei denen Sprinter ihre optimale Technik gar nicht einsetzen (können).

Leider konnten wir die maximale Sauerstoffaufnahme im Wasser nicht messen, so dass wir nicht wissen, wie groß die Korrelation der maximalen Sauerstoffaufnahme mit der Leistung nach der FINA-Tabelle ist. Im maximalen Belastungsbereich ist nicht mehr die Leistungskapazität limitierend, sondern die Messapparatur. Der Atemwiderstand im System steigt an und die Atemluft wird so trocken, dass dies oft zum Testabbruch führt. Diese Erfahrungswerte haben uns dazu veranlasst von Beginn an, keine maximale Ausbelastung zu fordern. Extrapolationen (25,81) mittels der Nachatmungsmethode nach

maximalen Belastungen im freien Schwimmen könnten hier sicherlich in der Zukunft wertvolle Daten liefern.

Costill (25) beschreibt, dass die maximale Sauerstoffaufnahme nicht mit der maximalen Leistung über 365,8m (400 yards) korreliert, im Gegensatz zum Laufen oder Radfahren, wo die maximale Sauerstoffaufnahme eng mit der Bestleistung in Mittel- und Langstreckendistanzen korreliert (57). Dies könne man nach Meinung des Autors nicht so interpretieren, dass die maximale Sauerstoffaufnahme unwichtig sei, sondern im Schwimmen seien eben noch andere Faktoren von großer Wichtigkeit. Andere Autoren beschreiben eine Korrelation von maximaler Sauerstoffaufnahme und Wettkampfleistung von $r = 0,47$ bis $r = 0,80$ (17, 25,93,98).

Tabelle 16 zeigt die Korrelationskoeffizienten des Indexes Z_T mit Merkmalen der 'Körperdimension' im weitesten Sinne. Die Merkmale Oberfläche, Gewicht und Größe hängen natürlich alle zusammen, denn ein großer Schwimmer ist normalerweise auch schwerer und umgekehrt. Aus der Literatur ist hinreichend bekannt, dass größere Schwimmer einen Vorteil haben (16,121). Dies soll zum einen mit günstigeren Strömungsverhältnissen längerer Körper und natürlich Vorteilen bei Start, Wende und der Zuglänge zusammenhängen (16). Es scheint auch Unterschiede der Körpergröße je nach Disziplin zu geben, wobei Mittelstrecken-Freistiler und Rückenschwimmer am größten und Schmetterlingsschwimmer am kleinsten sind (121).

Der Technikindex wird also auch von genetischen Merkmalen wie der Körpergröße mit beeinflusst. Der Körperfettanteil dagegen hat keinen entscheidenden Einfluss auf den Index Z_T in der betrachteten Probandengruppe. Das ist ein Hinweis darauf, dass es im Schwimmen nicht so sehr auf einen geringen Körperfettanteil ankommen könnte, obwohl andere Untersuchungen eine eindeutige Tendenz zu geringerem Körperfettanteil bei Spitzenathleten (104) und auch Schwimmern (43,99) zeigen konnten. Die Unterschiede der

vorgelegten Ergebnisse könnten z.B. mit dem sehr unterschiedlichen Probandengut (teilweise sehr junge Schwimmer) zusammenhängen, bei denen die Unterschiede im Körperfettanteil (besonders bei weiblichen Probanden, welche ja in unserer Gruppe überproportional vertreten waren) noch nicht so ausgeprägt sind (53,75).

Der bei Schwimmern gegenüber der Normalbevölkerung geringere Körperfettanteil (43,99) wird in der Literatur eher als Effekt des regelmäßigen Trainings angesehen und nicht als Grund für überdurchschnittliche Leistung. Der Trend der letzten Jahre ist es jedoch, durch Training die fettfreie Körpermasse zu erhöhen (147).

4.3.6 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T für drei Kategorien des Frequenzverhalten

Die Unterschiede in den verschiedenen Kategorien des Frequenzverhaltens sind nicht signifikant, aber es ergeben sich zwei eindeutige Trends.

Erstens scheint der beste Technikindex nicht mit einer sehr niedrigen Frequenz zu korrelieren, sondern eher mit einer moderaten. Dies könnte darauf hindeuten, dass es nicht erstrebenswert ist, eine sehr niedrige Frequenz zu erreichen, wie es als Ausdruck einer guten Technik oft empfohlen wird (25,32,35,51,118,135), sondern einen individuell optimalen Frequenzbereich zu finden. In der Literatur (25,32,35,51,118,135) wird durchweg eine enge Korrelation von Antriebswirkungsgrad (propelling efficiency) und der Zuglänge beobachtet. Chatard (17) beschreibt dagegen, dass eine geringere Zuglänge und höhere Frequenz mit einer höheren Wettkampfgeschwindigkeit korrelieren. Besonders die Zuglänge scheint aber auch mit den anthropometrischen Daten stark zu korrelieren (17,49). Neuste Untersuchungen von Mason (88) zeigen keine signifikante Beziehung zwischen

Wettkampfergebnis und Zuglänge im Wettkampf, bis auf die 50m und 100m Freistilstrecken bei den Männern.

Zweitens sinkt der Faktor 'b' mit sinkender Frequenz. Dies würde bedeuten, dass sich eine niedrige Frequenz erst bei höheren Geschwindigkeiten wirklich positiv auswirkt. Vielleicht erreichen einige Sportler mit einer niedrigen Frequenz diesen Geschwindigkeitsbereich aber gar nicht erst, so dass sich eine geringe Frequenz hier insgesamt nicht positiv auswirkt. Auch hier scheint es technisch sinnvoller zu sein eine moderate Frequenz zu wählen, die zwar bei sehr hohen Geschwindigkeiten nicht so ökonomisch ist wie eine geringere, aber in den erreichten Geschwindigkeitsbereichen ein Optimum darstellt.

Tabelle 18 vergleicht nur den Geschwindigkeitsbereich, den praktisch alle Sportler erreichen. Hier sind die niedrigsten und moderaten Zyklusfrequenzen ähnlich ökonomisch. Zukünftige Studien könnten klären, ob sich eine Reduktion der Frequenz und Verlängerung der Zuglänge individuell positiv auf die Ökonomie auswirkt, ob es einen individuell optimalen Frequenzbereich gibt oder ob durch bestimmte Trainingsformen die Zuglänge und gleichzeitig auch die Ökonomie erhöht werden können.

4.3.7 Größe der Sportler in den verschiedenen Kategorien des Frequenzverhaltens

Tabelle 19 zeigt, dass die Zyklusfrequenz auch wesentlich von der Größe eines Sportlers beeinflusst wird. Die größeren Sportler können offensichtlich mit niedrigeren Frequenzen schwimmen. Der Vorteil der Größe ist im Schwimmen gut bekannt (16,121). Ein Faktor dabei ist sicher der hydrodynamische Vorteil eines längeren Körpers (100), ein anderer der längere Zyklusweg (17,18).

Insgesamt hängen viele Faktoren eben miteinander zusammen. Der Technikindex beschreibt die persönlichen technischen Fähigkeiten, die natürlich auch genetische Voraussetzungen mit einbeziehen.

4.3.8 Faktoren A_{LBM} , b und Z_T unterteilt nach Kategorien der Körpergrößen

Tabelle 20 zeigt noch einmal wie die Größe mit dem Technikindex korreliert. Die größeren Individuen erreichen den besten Technikindex, ohne dass der Unterschied signifikant ist. Auch der Faktor 'b' ist bei den größeren Individuen am kleinsten ($p < 0,05$). Dies entspricht der bekannten Tatsache, dass längere Körper besonders bei höheren Geschwindigkeiten günstigere Strömungsverhältnisse aufweisen (100). Der Faktor ' A_{LBM} ' ist zwischen den beiden Gruppen nicht signifikant unterschiedlich. Dies könnte man so interpretieren, dass große Körper grundsätzlich keine bessere oder schlechtere Wasserlage haben als kleinere und dass der Vorteil von größeren Körpern erst bei hohen Geschwindigkeiten durch verbesserte Strömungsverhältnisse relevant wird.

4.3.9 Korrelationskoeffizienten der Kovarianzen für verschiedene Merkmale

Die Tabelle 21 zeigt wie alle Merkmale untereinander korreliert sind. Man muss berücksichtigen, dass einige Merkmale per Definition eine hohe Korrelation haben, denn die Körperoberfläche errechnet sich z.B. aus Gewicht und Größe. Genauso besteht eine hohe Korrelation zwischen den Faktoren A_{LBM} , b und Z_T , weswegen ja auch eine Formel eingeführt wurde, die die Korrelation näher beschreibt.

Der Faktor 'b' stellt dabei eine gewisse Ausnahme dar, weil seine Korrelation zum Technikindex an sich relativ gering ist. Das bedeutet, dass der Faktor 'b' nicht den Unterschied zwischen guten und schlechten Schwimmern ausmacht, sondern eher andere Merkmale (z.B. den Unterschied zwischen Sprintern und Langstrecklern) beschreibt. Die FINA-Punktzahl, als das Maß für die Wettkampfleistungsfähigkeit, ist signifikant mit der Körpergröße korreliert, eine Tatsache, die aus der Literatur bekannt ist (16,121). Die größte Korrelation der FINA-Punktzahl besteht aber mit dem Index Z_T , was darauf hindeutet, dass der Index einen hohen Vorhersagewert bezüglich der Wettkampfleistung hat.

Die Körperausmaße sind negativ mit dem Faktor 'b' und dem Index ' Z_T ' korreliert. Je größer die Körperausmaße, desto kleiner (besser) sind der Faktor 'b' und der Index ' Z_T '. Dies steht im Einklang mit den bekannten Beobachtungen, dass größere Schwimmer Vorteile in Bezug auf die Ökonomie haben (16,121). Der Faktor A_{LBM} dagegen korreliert positiv mit den Körperausmaßen, was bedeutet, dass kleinere Individuen 'bessere' Werte haben, und dies obwohl der Faktor bereits in Relation zur fettfreien Körpermasse (LBM) angegeben ist. Dies würde bedeuten, dass kleinere Individuen bei niedrigen Geschwindigkeiten, relative Vorteile haben, während große Sportler bei hohen Geschwindigkeiten relative Vorteile haben. Dies steht in Übereinstimmung mit Erfahrungen aus der Sportpraxis, wo Sprinter meist sehr groß sind, während manche Langstreckler relativ klein sind (131,132).

Der Körperfettanteil ist positiv mit dem Faktor 'b' korreliert. Mehr Körperfett wirkt sich also negativ auf diesen Faktor aus, die Strömungsverhältnisse werden ungünstiger.

Andererseits ist der Körperfettanteil negativ mit dem Faktor A_{LBM} korreliert. Ein steigender Körperfettanteil wirkt sich also positiv auf diesen Faktor aus. Der Faktor A_{LBM}

scheint also eher die Körperlage im Wasser zu beschreiben, die ja positiv durch einen höheren Körperfettanteil beeinflusst wird. (16,45).

4.4 Parameter der maximalen Leistungsabgabe

4.4.1 Maximale Sauerstoffaufnahme

Die gemessenen Werte der maximalen Sauerstoffaufnahme entsprechen im Wesentlichen denen von Saltin und Astrand (5), die zuerst mit einem am Beckenrand getragenen Douglas-Sack Messungen vornahmen. Später kamen Untersuchungen mit auf der Stelle schwimmenden Probanden (24,84) und dann auch Untersuchungen im Schwimmkanal (6,61) hinzu. Die Verwertbarkeit dieser Tests wurde oft angezweifelt, aber insgesamt lieferten sie alle ähnliche Ergebnisse (8). Was viele Wissenschaftler erstaunte war die Tatsache, dass im Schwimmen dabei geringere maximale Sauerstoffaufnahme-Werte erreicht wurden als z.B. im Radfahren, Laufen oder Skilanglaufen (5,38,57,59,60,61,84,89,90). Diese geringere maximale Sauerstoffaufnahme wurde einer geringeren aktiven Muskelmasse zugeschrieben. Es gibt aber auch Versuche, in denen die maximale Sauerstoffaufnahme im Schwimmen höher ist als im Laufen (38,84). Erklärungsmöglichkeiten werden in der unterschiedlichen Selektion der Probanden, unterschiedlichen Meßmethoden (freies Schwimmen, 'tethered swimming' oder Schwimmen im Kanal) oder dem Trainingszustand der Probanden gesucht.

Beim Training, welches zu einer Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme führt, wird zwischen zentralen und peripheren Anpassungen unterschieden. Zentrale Anpassungen beinhalten ein höheres Blutvolumen, höhere Erythrozytenproduktion, sowie

ein höheres Schlag- und Minutenvolumen. Diese Anpassungen erhöhen vor allem die Sauerstofftransportkapazitäten. Periphere Anpassungen umfassen eine höhere Kapillardichte, Mitochondrienanzahl und -volumen, eine höhere Aktivität von oxidativen Enzymen und eine höhere arterio-venöse Sauerstoffdifferenz und führen zu einer verbesserten Sauerstoffausnutzung im Muskel. Daher ist es nicht verwunderlich, dass Athleten grundsätzlich die höchste maximale Sauerstoffaufnahme in ihrer spezifischen Sportart erreichen. Schwimmen stellt dabei nach Aussage einiger Autoren eine Ausnahme dar, was z.B. durch die geringere belastete Muskelmasse und die horizontale Lage erklärt wird (60). Für Untrainierte gilt, dass die maximale Sauerstoffaufnahme im Laufen ca. 10% höher liegt als beim Fahrradfahren (5,54,58). Ein Grund könnte sein, dass beim Laufen als einziger der drei Sportarten (Schwimmen, Radfahren, Laufen) das Körpergewicht getragen werden muss und die Belastung einen beträchtlichen Anteil exzentrischer Muskularbeit beinhaltet.

Für Untrainierte ist bekannt, dass die Maximalwerte der Sauerstoffaufnahme im Schwimmen nur 75-80% im Vergleich zum Laufen betragen (58,59), während Schwimmer ungefähr 95% der maximalen Sauerstoffaufnahme im Vergleich zum Laufen erreichen (42,58,84). Obwohl trainierte Schwimmer durchaus hohe Werte der maximalen Sauerstoffaufnahme im Laufen erreichen (3,61 bis 4,55 L/min) (58,63,84) wirkt sich Schwimmtraining offensichtlich nicht wesentlich positiv auf die maximale Sauerstoffaufnahme im Laufen aus (42), während im umgekehrten Fall Lauftraining sehr wohl einen positiven Effekt, wenn auch geringer im Vergleich zum Effekt im Laufen, auf die maximale Sauerstoffaufnahme im Schwimmen hatte (90).

Für Untrainierte wurden im Schwimmen im Vergleich zum Radfahren etwa 10-15% geringere Werte der maximalen Sauerstoffaufnahme gemessen (58,59), während

hochtrainierte Schwimmer beim Schwimmen bis zu 5% höhere Werte erreichten als beim Radfahren (58,59,74).

In der von uns beschriebenen Versuchsanordnung war eine maximale Ausbelastung während des Tests nicht unbedingt gefordert, so dass wir davon ausgehen können, dass im Schnitt theoretisch noch höhere Leistungen erreicht werden können. Außerdem wurde der Test in vielen Fällen abgebrochen, weil die Probanden über den Schnorchel subjektiv nicht mehr genug Luft bekamen. Auch aus diesem Grund kann man davon ausgehen, dass die tatsächliche maximale Sauerstoffaufnahme noch höher liegt, als die hier gemessenen Werte.

Für die Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme sind wahrscheinlich diejenigen Messwerte am repräsentativsten, die nach einer maximalen Belastung im Schwimmbecken unmittelbar nach Belastungsende gemessen werden können. Diese Art der Messdatengewinnung wurde zuerst von di Prampero (112) und später auch von anderen Autoren (25,80,81,92) genutzt. Der große Vorteil ist, dass das Schwimmen nicht durch die Messapparatur eingeschränkt ist und die eigentliche Messung erst nach der Belastung erfolgt. In diesen Tests ist die maximale Sauerstoffaufnahme größer als z.B. im Laufen (92), was unsere Beobachtungen belegt, dass das Schwimmen mit Maske bei maximalen Belastungen zum Abbruch zwingt, noch bevor die maximale Sauerstoffaufnahme erreicht wird.

4.5 Abschließende Diskussion

4.5.1 Mechanischer Wirkungsgrad

Zuerst konnten wir durch theoretische Überlegungen zeigen, dass der mechanische Wirkungsgrad (gross efficiency) für die relevanten Geschwindigkeitsbereiche für Schwimmer verschiedenen Geschlechts und unterschiedlicher Leistungsklassen immer gleich ist, wenn man nur die Netto-Energie für die Berechnung berücksichtigt (4.1.2). Wenn also der Schwimm-Wirkungsgrad (swimming efficiency) das Produkt aus mechanischem Wirkungsgrad (gross efficiency) und Antriebswirkungsgrad (propelling efficiency) ist (71,139,141), so bleibt nur noch der Antriebswirkungsgrad als Einflussgröße auf den Schwimmwirkungsgrad. Es muss also erklärtes Ziel sein, diesen Antriebswirkungsgrad zu quantifizieren.

4.5.2 Mathematisches Modell der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit

Wir konnten außerdem zeigen, dass das mathematische Modell die individuelle Änderung der Leistungsabgabe mit der Geschwindigkeit ($y = A_{LBM} * v^{b+1}$) sehr zuverlässig und mit einer hohen Korrelation zu den tatsächlich gemessenen Werten beschreibt (3.2.2). Dies ist von Bedeutung, wenn eine Extrapolation in höhere Geschwindigkeitsbereiche zuverlässig sein soll. Der zweite große Vorteil ist, dass jetzt die persönliche 'Leistungskurve' durch die beiden Faktoren 'A_{LBM}' und 'b' beschrieben werden kann, während man früher immer annahm, dass zumindest der Faktor 'A' unabhängig von der Geschwindigkeit ist (55,73,137) und individuelle Schwankungen nicht signifikant sind. So ist ein Vergleich

zwischen Individuen viel einfacher möglich, denn ein Vergleich der reinen abgegebenen Leistung (auch der relativen Leistung pro kg) gilt immer nur für eine bestimmte Geschwindigkeit. Die Messwerte zeigen, dass Schwimmer, die in einem Geschwindigkeitsbereich effektiv (mit wenig Energie) schwimmen, bei einer anderen (höheren) Geschwindigkeit eventuell wieder sehr ineffektiv (mit hohem Energieaufwand) schwimmen.

Diese Erkenntnis kann genutzt werden um Schwimmer und deren Entwicklung in Bezug auf effizientes Schwimmen, über das Wettkampfsjahr oder sogar mehrere Jahre zu verfolgen. Genauso können auch unterschiedliche Individuen verglichen werden und Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert werden.

Für diese Vergleiche ist es wichtig im Laufe der Zeit einen größeren Pool von Vergleichsdaten aufzubauen, um erste Trends aus den vorliegenden Ergebnissen zu bestätigen. Auch sollten weiterhin außergewöhnlich leistungsfähige Individuen beobachtet werden, um evt. Charakteristika zu identifizieren, die diese Individuen auszeichnen. Genauso sollten Unterschiede zwischen Sprintern, Mittel- und Langstrecklern bzw. männlichen und weiblichen Schwimmern weiter verfolgt werden, um mögliche Merkmale dieser Gruppen zu identifizieren und so vielleicht schon jungen Schwimmern Hinweise bezüglich ihrer Eignung geben zu können.

4.5.3 Faktoren A_{LBM} und b

Die Faktoren ' A_{LBM} ' und ' b ' schwanken zwischen verschiedenen Messungen eines Individuums. Diese Faktoren sind also kein konstantes Merkmal eines Schwimmers, sondern es scheint vielmehr so zu sein, dass jeder Schwimmer einen gewissen Bereich hat, in dem diese Merkmale schwanken können (4.2.5-4.2.7). Dies ist allerdings nicht völlig unerwartet, denn Schwimmer kennen diese Schwankungen der Fähigkeit, Energie in Vortrieb umzusetzen. An manchen Tagen, wenn die objektive Leistungsfähigkeit - gemessen nur an der Möglichkeit Energie zu erzeugen gemessen - höher ist als an anderen Tagen, werden trotzdem niedrigere Geschwindigkeiten erreicht, weil die Energie einfach nicht so effektiv umgesetzt werden kann.

Wir konnten allerdings auch zeigen, dass die Schwankungen der beiden Faktoren ' A_{LBM} ' und ' b ' voneinander abhängig sind (4.2.5). Sobald einer der beiden Faktoren größer wird, wird der andere kleiner. Diese Regelmäßigkeit führte zu dem Versuch, die Abhängigkeit auch mathematisch zu beschreiben. Eine Abhängigkeit im mathematischen Sinne ist eine Funktion, d.h. wenn eine Variable bekannt ist, kann die andere vorausgesagt werden und umgekehrt. Die Funktion, welche die Abhängigkeit in diesem Fall beschreibt, hat die Form $y = c + a * x$. Der Faktor ' a ' ist konstant für die gesamte Gruppe der Probanden, während die Konstante ' c ' für jeden Athleten individuell unterschiedlich ist, sich aber andererseits von einem zum anderen Test nicht verändert. Die Konstante ' c ' ist also ein individuelles Merkmal, welches sich für ein Individuum von einem zum anderen Test nicht ändert, andererseits aber Unterschiede zwischen Individuen beschreibt. Dieses Merkmal wurde als Technikindex Z_T bezeichnet, weil es im Gegensatz zu anderen Merkmalen, interindividuelle Unterschiede beschreibt, für ein Individuum jedoch konstant ist. Wir können jedoch nur die Konstanz des Merkmales für die zwei durchgeführten Tests

feststellen. Ob sich der Technikindex über noch mehr Tests hinweg als konstant erweist, muss noch erforscht werden. Ein Hinweis darauf, dass dies zu erwarten ist, ist die Tatsache, dass der Index für fast alle Probanden zwischen den beiden Tests konstant war. Sollte es größere Schwankungen geben, hätte man erwartet, dies bei 23 getesteten Probanden in Form von deutlich unterschiedlichen Technikindices zwischen den 2 Tests zu sehen. Ein zweiter Hinweis sind zusätzliche Tests der gleichen Probanden unter ähnlichen Bedingungen, welche praktisch identische Technikindices ergaben.

Interessant für zukünftige Forschung könnte vor allem sein, wie sich die Faktoren A_{LBM} und b verändern, wenn der Technikindex konstant bleibt. Außerdem interessant könnte es sein zu verfolgen, ob sich der Faktor b während des Taperings verändert also kleiner wird und damit der höhere Geschwindigkeitsbereich effektiver wird.

4.5.4 Technikindex Z_T

Der Technikindex Z_T zeigt den eindeutigen Trend, bei guten Schwimmern kleiner zu sein als bei schlechten. Dies ist bedeutungsvoll, da der Technikindex nur die Fähigkeit beschreibt, Energie effektiv (ohne unnötige Energieverluste) in Geschwindigkeit umzusetzen. Er trifft keine Aussage darüber, wie viel Energie der Schwimmer maximal erzeugen kann, was ja sonst immer als das klassische Leistungskriterium gilt (maximale Sauerstoffaufnahme) (5,38,57,59,60,61,84,89,90).

Zukünftige Forschung könnte hier zeigen, wie konstant der Technikindex im Verlaufe der Saison für einen Sportler ist oder ob es bestimmte Veränderungen in bestimmten Trainingsphasen gibt. Genauso sollte untersucht werden, welche Trainingsreize und Trainingsübungen den Index positiv oder negativ beeinflussen, um Verbesserungen

zielgerichtet erreichen zu können. Insgesamt sollte überhaupt die Effizienz des Schwimmens weiter in den Mittelpunkt des Trainings rücken, wenn man die herausragende Bedeutung bedenkt.

4.5.5 Vor- und Nachteile der Atemgasanalyse gegenüber der Laktatbestimmung

Es ist bekannt, dass die Blutlaktatanalyse verschiedene Schwächen hat, die eine Interpretation erschweren (44,48,72,134). Dazu zählen der Zeitpunkt und Ort der Abnahme, Art der Konservierung, Ernährungszustand des Sportlers, Trainingszustand, Hydratation und Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) (44,48,72,129,134). Andererseits gibt es eine Fülle von Tests, die Laktatverhalten im Sinne einer Leistungsbeurteilung oder für Trainingsempfehlungen interpretieren (83,101,102,117,126). Viele dieser Tests haben ihren festen Platz in der Leistungsdiagnostik und Trainingsbewertung von Schwimmern, aber alle Autoren weisen immer wieder darauf hin, wie wichtig es ist, die Testbedingungen so weit wie möglich zu standardisieren, denn kleinste Veränderungen (z.B. im Trainings- oder Ernährungszustand) können große Veränderungen im Testergebnis verursachen (83,101,102,117,126).

Die zugrunde liegende Annahme bei allen diesen Tests ist, dass die höhere Intensität der Belastung eine Zunahme der Laktatakkumulation verursacht, welche den zunehmenden Energiebedarf reflektiert. Dass an dieser Laktatakkumulation viele verschiedene Systeme beteiligt sind, wird oft vernachlässigt, aber zumindest hat die Dauer der Belastung ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf die Höhe der Laktatakkumulation (129). Zusätzlich muss man bedenken, dass der Laktatspiegel nur eine Akkumulation der anaeroben Stoffwechselprodukte anzeigt, während man implizit annimmt, dass der

Wirkungsgrad immer gleich ist und auch andere den Laktatspiegel beeinflussende Faktoren (Pufferkapazität, Glykogenbeladung, Diffusionsraten) keinen entscheidenden Einfluss haben. Daraus wird dann eine Änderung der aeroben Leistungsfähigkeit abgeleitet. Diese Annahmen treffen aber sicherlich nicht immer zu. Folgerichtig haben einige Autoren z.B. die Technik als einen sehr wichtigen Einflußfaktor (126,127) erkannt, deren Veränderung sich eindeutig im Ergebnis von Blutlaktatanalysen niederschlägt.

Auch die Atemgasanalyse hat verschiedene Schwächen, wozu unter anderem die geringe Verfügbarkeit, der hohe Aufwand und die unter 2.4 aufgeführten Einschränkungen zählen. Auch hier ist es wichtig die Messbedingungen möglichst konstant zu halten, während andere Einflussfaktoren, wie z.B. der Ernährungszustand, anhand des RQ erkannt und berücksichtigt werden können. Ein Vorteil ist jedoch, dass zumindest im aeroben Belastungsbereich, die gesamte erzeugte Energie erfasst wird und auch in höheren Belastungsbereichen in Verbindung mit der Laktatanalyse ebenfalls die gesamte erzeugte Energie gemessen werden kann. Erst die Kenntnis aller dieser Parameter erlaubt eine exakte Beurteilung von aerober und anaerober Leistungsfähigkeit, sowie der Ökonomie. Die Wichtigkeit der Ökonomie wurde von verschiedenen Autoren beschrieben (26,111,139), da jedoch die Ergebnisse von Messungen bei geringeren Geschwindigkeiten nicht auf solche bei hohen zu übertragen waren, wurde die Relevanz für die Wettkampfleistung bezweifelt. Auch die hier präsentierten Ergebnisse zeigen, dass eine Extrapolation von Messungen bei geringen Geschwindigkeiten alleine oft fehlerhaft sein wird, denn entscheidende Unterschiede in der Ökonomie treten oft erst bei höheren Geschwindigkeiten auf. Gerade diese Unterschiede werden jedoch durch die individuellen Faktoren A_{LBM} und b berücksichtigt.

Für die Zukunft muss es das Ziel sein, die Atemgasanalyse auch im Schwimmbecken und nicht nur im Schwimmkanal anzuwenden. Durch Extrapolation von Werten aus der

unmittelbaren Nachbelastungsphase (Nachatmungsphase) sind sehr verlässliche Werte zu erzielen (92,124), während das Schwimmen in keiner Weise beeinflusst wird.

4.5.6 Unterschiede der Faktoren A_{LBM} und b in verschiedenen Gruppen

Die Unterschiede der Faktoren ' A_{LBM} ' und ' b ' bei bestimmten Gruppen sind auffällig, besonders die Tatsache, dass der Faktor ' b ' für Sprinter und männliche Schwimmer kleiner ist. Beide Gruppen erreichen im Verhältnis zu den Vergleichsgruppen höhere Geschwindigkeiten im Wettkampf. Es könnte die Strategie des menschlichen Körpers sein, für sehr hohe Geschwindigkeiten, wie sie besonders männliche Sprinter schwimmen, ein unökonomisches Schwimmen bei geringen Geschwindigkeitsstufen in Kauf zu nehmen, um bei hohen Geschwindigkeiten ökonomisch sein zu können. Dies würde tendenziell auch durch Untersuchungen von Caepert (9) unterstützt, der sehr hohe Unterschiede im Antriebswirkungsgrad für Sprinter, Mittel- und Langstreckler bei niedrigen Geschwindigkeiten ermittelte, wobei die Sprinter am unökonomischsten waren. Dies würde bei geringen Geschwindigkeiten auch Sinn machen, da Sprinter in solchen Geschwindigkeitsbereichen nicht ökonomisch sein müssen.

Dies wäre wiederum für das Training bedeutsam, denn man könnte argumentieren, dass für Sprinter das ökonomische Schwimmen bei geringen Geschwindigkeitsstufen kontraproduktiv ist, wenn sie sich hier Bewegungsmuster aneignen, die in höheren Geschwindigkeitsbereichen nicht mehr vorteilhaft sind. Eine Konsequenz davon könnte wiederum sein, gerade Sprintern das Schwimmen z.B. durch Flossen zu erleichtern, um

Bewegungsmuster auszuprägen, welche bei hohen Geschwindigkeiten gefordert sind, ohne sie dabei metabolisch zu überlasten.

Vielleicht unterscheidet sich auch die 'Durchschnitts-Strategie' zwischen männlichen und weiblichen Schwimmern, wobei die weibliche Strategie eine gute Wasserlage und ökonomisches Schwimmen auch schon bei geringen Geschwindigkeiten ausmachen könnte (11,45). Dies könnte bedeuten, dass hier vielleicht ganz andere 'Körper' gefordert sind als bei Männern. Zumindest im Durchschnitt erreichen die weiblichen Probanden der Gruppe geringere Wettkampfgeschwindigkeiten als die männlichen, so dass tendenziell eine Optimierung bei weiblichen Probanden eher auf diesen etwas niedrigeren Geschwindigkeitsbereich ausgerichtet sein wird.

Diese Theorie wirft natürlich völlig neue Fragen auf. Wenn eine Optimierung bei geringeren Geschwindigkeiten, wie sie z.B. von jüngeren Athleten erreicht werden, zu einer Selektion führt, die nur für diesen Geschwindigkeitsbereich optimiert ist, gehen dann nicht Talente in der Selektion verloren, weil sich ihre Optimierung für hohe Geschwindigkeiten, wie sie vielleicht erst später in der Entwicklung auftreten, zu diesem frühen Zeitpunkt nicht zeigen? Dies würde z.B. bedeuten, dass sich ein Talent zum Sprinter manchmal erst sehr spät zeigen kann, während das Talent eines Langstreckenschwimmers schon früher erkannt werden könnte?

Wir wissen noch nicht, inwieweit sich die Faktoren ' A_{LBM} ' und ' b ' verändern lassen oder nicht bereits angeboren sind. Der Technikindex und die Faktoren ' A_{LBM} ' und ' b ' beschreiben die Fähigkeit mit wenig Energieaufwand hohe Geschwindigkeiten zu erreichen. Ein Teil dieser Fähigkeiten ist sicherlich angeboren, da wir wissen, dass ein großer und langer Körper besser umströmt wird und mit weniger Energieaufwand höhere Geschwindigkeiten erreichen kann (16,100,121). Von großem Wert könnte es allerdings in der Sichtung sein, solche Talente zu identifizieren, die hohe technische Fähigkeiten haben,

aber deren metabolische Leistungsfähigkeit noch gering ist, die also noch eine gute Perspektive haben, weil sie überproportional von einer Entwicklung der allgemeinen Leistungsfähigkeit profitieren können.

Zukünftige Untersuchungen können zeigen, wie und ob sich die Faktoren A_{LBM} und b verändern lassen und durch welches Training.

4.5.7 Zyklusfrequenzen und Zykluswege/Zuglängen

Auch auffällig ist, dass sich eine niedrige Zyklusfrequenz und lange Zykluswege offensichtlich nicht automatisch positiv auf den Technikindex auswirken, was vielen bekannten Veröffentlichungen zu diesem Thema auf den ersten Blick zu widersprechen scheint (25,32,35,51,118,135). Es hat den Anschein, dass eher die moderaten Frequenzen mit einer guten Technik korrelieren. Dies würde bedeuten, dass es nicht immer erstrebenswert ist, eine noch niedrigere Frequenz zu erreichen, sondern dass es einen optimalen Bereich gibt, den es für jeden persönlich auszutesten gilt. Dies widerspricht allerdings nicht unbedingt den bekannten Theorien (25,32,35,51,118,135), denn die Beobachtung, dass eine Verbesserung der Technik mit einer Verringerung der Zyklusfrequenz und Verlängerung des Zyklusweges einhergeht, lässt ja nicht gleichzeitig den Umkehrschluss zu, dass jede niedrige Frequenz automatisch eine gute Technik beschreibt.

Vielmehr scheint es so zu sein, dass sich eine Verbesserung der Technik als eine individuelle Verlängerung des Zyklusweges bemerkbar macht. Der Zyklusweg könnte dann individuell als Monitoring für die Technik dienen, einen Vergleich zwischen Individuen lässt er jedoch nicht zu, da jedes Individuum offensichtlich einen persönlichen

optimalen Frequenzbereich besitzt (35). Man muss außerdem immer die Kombination der beiden Größen Zyklusfrequenz und Zykluslänge betrachten. Jemand, der mit einer längeren Zyklusfrequenz schwimmt, dabei aber mit der Frequenz in gleichem Maße abfällt, wird keinen Nutzen daraus ziehen. Chollet (19) zeigte, dass in einem 100m Freistilrennen, diejenigen Schwimmer am besten abschneiden, die eine hohe Zuglänge bei hoher Zyklusfrequenz über die gesamte Länge der Distanz durchhalten können. Eine Verbesserung tritt also nur dann ein, wenn bei einer Verlängerung des Zyklusweges auch die Zyklusfrequenz hoch bleibt, und auch für das gesamte Rennen so hoch gehalten werden kann.

Pease (105) konnte zeigen, dass Schwimmer bei steigenden Geschwindigkeiten zuerst bei relativ konstanten Zyklusfrequenzen die Zykluslänge steigern, welche dann ab einer individuell unterschiedlichen Geschwindigkeit wieder abfällt, während die Zyklusfrequenz deutlich ansteigt. Er schlägt vor dieses persönliche Profil zur Beurteilung von technischen Fähigkeiten und Verbesserungen zu nutzen.

Ein direkter Vergleich der absoluten Werte von Frequenz und Zuglänge in der vorliegenden Studie mit solchen aus der Literatur ist nur bedingt möglich. Neben Alter, Geschlecht, Leistungsstand und Streckenlänge hat natürlich auch der Grad der Ausbelastung Einfluss auf die gemessene Frequenz. Pelayo (107) berichtet aber z.B. von Frequenzen bei maximalen Belastungen über 200m und 400m Freistil von 44 bzw. 41 Zyklen pro Minute bei durchschnittlichen Geschwindigkeiten von 1,50 bzw. 1,42 m/s, was der Größenordnung der in der vorliegenden Studie gemessenen Werte entspricht.

4.5.8 Ausblick

Die vorliegende Studie unterstreicht die außergewöhnliche Bedeutung der Technik für die Wettkampfleistung im Schwimmen. Die Messung der Ökonomie oder Effizienz ist ein wichtiger Schritt, um visuelle Kriterien für technische Fähigkeiten zu ergänzen.

Aufgabe zukünftiger Forschung wird es sein, Ergebnisse der vorliegenden Studie zu überprüfen und Charakteristika bestimmter Untergruppen weiter herauszuarbeiten. Sehr homogene Gruppen von reinen Sprinter oder Langstrecklern könnten z.B. helfen Merkmale eindeutiger zu unterscheiden. Auch sollten außergewöhnlich gute Sportler verstärkt auf ihre Merkmale untersucht werden, um besonders positive Merkmalsausprägungen identifizieren zu können.

Ein wichtiger Schritt für die Zukunft wird es sein, mit Hilfe der Nachatmung Ergebnisse aus dem Schwimmbecken für die Analyse zu nutzen. Dabei wird das Schwimmen nicht beeinträchtigt und man kann relativ viele Sportler in kurzer Zeit mit kleinen mobilen Einheiten, welche nicht für den Einsatz im Wasser geeignet sein müssen, untersuchen, was die Akzeptanz als Analysemethode erhöhen wird. Ziel sollte es sein schon mit wenigen Stufen (≤ 5) eine valide Aussage zu erreichen und wenn möglich auch kürzere Schwimmstrecken (100m) anzustreben, denn erst dann können z.B. Sprinter ihr wirkliches Potential und relevante Geschwindigkeiten erreichen. Eine große Herausforderung wird es sein, die metabolische Leistung für kurze Strecken (z.B. 100m) bei hohen Belastungen zu ermitteln, denn dann muss neben der aeroben und anaerob-laktaziden Energie auch die anaerob-alaktazid erzeugte Energie berücksichtigt werden. Diese wird in der vorliegenden Untersuchung vernachlässigt, weil sie bei bis zu 7 Stufen von 3 Minuten Länge und einminütigen Pausen nicht mehr relevant ist. Bei maximalen Belastungen über 100m Freistil aber kann die anaerob-alaktazid erzeugte Energie bis zu 30% der insgesamt

erzeugten Energie ausmachen (114) bzw. bis zu 37 ml/kg (87,110,114), wenn man von keiner Sauerstoffschuld zu Beginn der Belastung ausgeht. Theoretisch kann man jedoch auch diese Energiemenge mit Hilfe der Sauerstoffschuld in der Nachbelastungsphase messen (114).

Ein weiteres Ziel sollte es sein, die Methodik auch für die anderen Stilarten (Rücken-, Brust- und Schmetterlingschwimmen) zu etablieren, was theoretisch kein Problem darstellen sollte.

5. Zusammenfassung

5.1 Zusammenfassung: deutsch

Es gibt im Schwimmsport verschiedene Methoden, die Leistungsfähigkeit und Ökonomie zu messen, dazu zählen die Laktatdiagnostik, welche aerobe und anaerobe metabolische Fähigkeiten bestimmt, sowie die Spiroergometrie, die eine Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme und technischer Fähigkeiten erlaubt. Die vorliegende Studie soll durch eine individuelle Zuordnung von metabolischer Leistung und Schwimmgeschwindigkeit ein Maß für die Ökonomie der Schwimmbewegung identifizieren, welches im Sinne der Leistungsdiagnostik nutzbar ist.

Dazu wurden 23 Leistungsschwimmer ($16,7 \pm 3,5$ Jahre; 15 weiblich, 8 männlich) an zwei verschiedenen Tagen innerhalb einer Woche einem Stufentest im Schwimmkanal mit 3minütiger Belastungsdauer und jeweils 1minütiger Pause im Freistilschwimmen (Kraul) unterzogen. Die Geschwindigkeit wurde von zu Beginn 1,01 m/s um jeweils 0,09 m/s bis zum Belastungsabbruch oder maximal 1,55 m/s gesteigert. Der Sauerstoffverbrauch und die Blutlaktatkonzentrationen wurden für jede Geschwindigkeitsstufe gemäß $P_{O_2} = (4,940 * RQ + 16,040) * VO_{2\text{-netto}} / 60$ bzw. $P_{\text{lac}} = ([\text{Lac}_{\text{exerc}}] - [\text{Lac}_{\text{rest}}]) * 60 * M_{\text{mass}} / t_{\text{exerc}}$ in metabolische Leistung umgerechnet.

Es ergab sich eine hochsignifikante Beziehung der Form $P = A_{\text{LBM}} * v^{b+1}$ ($p < 0,001$). Die Faktoren 'A_{LBM}' und 'b', welche die individuelle Veränderung der Ökonomie in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit beschreiben, wurden zu einem Technikindex (Z_T) zusammengefasst, welcher 47% der Varianz der Bestleistung über 200m Freistil erklärt. Der Index (Z_T) zeigt außerdem signifikante bzw. hochsignifikante Unterschiede für die bessern Schwimmer der Gruppe im Vergleich zu den durchschnittlichen und schlechteren Schwimmern.

Der Technikindex (Z_T) ist ein verlässlicher Parameter, um die Ökonomie der Schwimmbewegung zu beschreiben und kann leistungsdiagnostisch sowohl für Längs- als auch Querschnittsuntersuchungen genutzt werden. Die Ergebnisse unterstreichen die herausragende Bedeutung der Ökonomie (Technik) im Schwimmsport und belegen die individuell unterschiedliche Veränderung der Ökonomie mit der Geschwindigkeit. Für das Training bedeutet dies, dass statt großer Trainingsumfänge vor allem die technisch hochwertige Ausführung der Schwimmbewegung im Hochgeschwindigkeitsbereich angestrebt werden sollte.

5.2 Summary: English

In swimming different measures are known to determine performance and economy including lactate tests for the assessment of aerobic and anaerobic metabolic capacity as well as spiroergometric tests for maximum oxygen consumption and technical skill. The current study aims to identify reliable parameters which describe the economy of swimming and can be used for performance evaluation and tracking on an individual level. 23 competitive swimmers (16.7 ± 3.5 years; 15 female, 8 male) performed two identical exercise protocols in a swimming flume on separate days within one week swimming freestyle (front crawl). 3 minute exercise periods were followed by 1 minute of rest, starting at 1.01 m/s and escalating in steps of 0.09 m/s until exhaustion. Oxygen consumption and blood lactate levels for each velocity step were converted to metabolic power output according to $P_{O_2} = (4.940 * RQ + 16.040) * VO_{2-netto} / 60$ respectively $P_{lac} = ([Lac_{exerc}] - [Lac_{rest}]) * 60 * M_{mass} / t_{exerc}$.

The resulting function $P = A_{LBM} * v^{b+1}$ ($p < 0.001$) was highly significant. The factors 'A_{LBM}' and 'b', which characterize the individual change in economy with swimming speed, were combined to a 'technique index' (Z_T) which explains 47% of the variance of the best performance in the 200m freestyle event. The Index (Z_T) showed significant differences for the better swimmers of the group compared to average ($p < 0.05$) and below average swimmers ($p < 0.001$).

The index (Z_T) proved a reliable parameter to evaluate and track the economy of individual swimming motions. The results demonstrate the outstanding importance of swimming economy (technique) for race performance and the individual change of economy with swimming speed. In conclusion training objectives should focus more on high quality execution of technical requirements at high swimming speeds as opposed to volume and distance.

6. Literaturverzeichnis

1. Agostino E, Gurtner G, Torri G, Rahn H. Respiratory mechanics during submersion and negative-pressure breathing. *J Appl Phys* 1966; 21: 251-258
2. Alley LE. An analysis of water resistance and propulsion in swimming the crawl stroke. *Res Q* 1951; 23: 253-270
3. Andersen KL. Energy cost of swimming. *Acta Chir Scand* 1960; 253: 169-174
4. Arellano R. Evaluating the Technical Race Components during the Training Season. Eds.: The Faculty of Education at The University of Edinburgh, Edinburgh. ISBS online Publication 1999
5. Astrand PO, Saltin B. Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J Appl Phys* 1961; 16: 977-981
6. Astrand PO, Englesson S. A swimming flume. *J Appl Phys* 1972; 33: 514
7. Berger MAM, Hollander AP, Groot G de. Technique and energy losses in front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc* 1997; 29: 1491-1498
8. Bonen A, Wilson BA, Yarkony M, Belcastro AN. Maximal oxygen uptake during free, tethered, and flume swimming. *J Appl Phys* 1980; 48: 232-235
9. Caepfert JM, Franciosi PQ, Langerhans GW. Indirect calculation of mechanical and propelling efficiency during freestyle swimming. In: MacLaern D, Reilly T, Lees A, eds.: *Swimming science VI: Biomechanics and medicine in swimming*. London: E&FN Spon 1992: 53-56
10. Caepfert JM, Bone M, Troup JP. Intensity and performance related differences in propelling and mechanical efficiencies. In: MacLaern D, Reilly T, Lees A, eds.: *Swimming science VI: Biomechanics and medicine in swimming*. London: E&FN Spon 1992: 49-52

11. Capelli C, Zamparo P, Cigalotto A, Francescato MP, Soule RG, Termin B, Pendergast DR, di Prampero PE. Bioenergetics and biomechanics of front crawl swimming. *J Appl Physiol* 1995; 78: 674-679
12. Cerretelli P, Piiper J, Mangili F, Ricci B. Aerobic and anaerobic metabolism in exercising dogs. *J Appl Physiol* 1963; 19: 29-32
13. Cerretelli P, Borondi U, Debijadji R, Saracino F. Respiratory and circulatory factors affecting the maximal aerobic power in hypoxia. *Arch Fisiol* 1967; 65: 344-357
14. Cerretelli P, di Prampero PE, Piiper J. Energy balance of anaerobic work in the dog gastrocnemius muscle. *Am J Physiol* 1969; 217: 581-585
15. Charbonnier JP, Lacour JR, Riffat J. Experimental study of performance of competition swimmers. *Eur J Appl Physiol* 1975; 34: 157-167
16. Chatard JC, Padilla S, Cazorla G. Influence of body height, weight, hydrostatic lift and training on the energy cost of the front crawl. *NZ J Sports Med* 1985; 13: 82-84
17. Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. *Eur J Appl Physiol* 1990; 61: 88-92
18. Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. Energy cost of front-crawl swimming in women. *Eur J Appl Physiol* 1991; 61: 12-16
19. Chollet D, Pelayo P, Delaplace C, Tourny C, Sidney M. Stroking characteristic variations in the 100-M freestyle for male swimmers of differing skill. *Percept Mot Skills* 1997; 85: 167-177
20. Clarys JP. Human morphology and hydrodynamics. In: Terauds J, Bedingfield EW, eds.: *Swimming III*. Baltimore: University Park Press 1979: 3-43
21. Clasing D, Weiker H, Böning D. Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag 1994; 11-25, 47-64, 81-87
22. Coen B. Individuelle anaerobe Schwelle. Frankfurt: Strauß 1997

23. Cordain L, Kopriva R. Wetsuits, body density and swimming performance. *Br J Sp Med* 1991; 25(1): 31-33
24. Costill DL. Use of swimming ergometer in physiological research. *Res Quat* 1966; 37: 564-567
25. Costill DL, Kovaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D. Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *Int J Sports Med* 1985; 6: 266-70
26. Costill DL, Kings DS, Thomas R. Effects of reduced training on muscular power in swimmers. *Physician Sportsmed* 1985; 13: 94-101
27. Counsilman JE. The role of sculling movements in the arm pull. *Swimming World* 1969; 10: 6-7
28. Counsilman JE. The application of Bernoulli's principle to human propulsion in water. In: Lewille L, Clarys JP, eds.: *Swimming I*. Brussels: Universite Libre de Bruxelles 1971: 59-71
29. Counsilman JE, Counsilman BE. *The new science of swimming*. New Jersey: Prentice-Hall 1994; 30, 31, 38-46
30. Craig AB, Dvorak M. Thermal regulation of man exercising during water immersion. *J Appl Physiol* 1968; 25: 28-35
31. Craig AB, Boomer WL, Gibbson JF. Use of stroke rate, distance per stroke, and velocity relationships during training of competitive swimming. In: Terauds and Bedingfield, eds.: *Swimming III*, Baltimore: University Park Press 1979; 265-274
32. Craig AB, JR, Pendergast DR. Relationship of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. *Med Sci Sports* 1979; 11: 278-283
33. Craig AB, Pendergast DR. Relationships of stroke rate, distance per stroke and velocity in competitive swimming. *Swimming Technique* 1980; 17: 23-29

34. Craig AB, JR, Boomer W, Skehan P. Testing your swimmers: stroke rate-velocity-distance per stroke. *Swimming Technique* 1982; 23(4): 23-25
35. Craig AB, Skehan PL, Pawelczyk JA. Velocity, stroke rate and distance per stroke during elite swimming competition. *Med Sci Sports Exerc* 1985; 625-634
36. Daniels JT. A physiologist's of running economy. *Med Sci Sports Exercise* 1985; 17: 332-338
37. Davis JA, Caiozzo VJ, Lamarra N, Ellis JF, Vandagriff R, Prietto CA, McMaster WC. Does the gas exchange anaerobic threshold occur at fixed blood lactate concentrations of 2 or 4 mM? *Int J Sports Med* 1983; 4: 89-93
38. Dixon RW, Faulkner JA. Cardiac outputs during maximal effort running and swimming. *J Appl Phys* 1971 30: 653-656
39. Dubois-Reymond R. Zur Physiologie des Schwimmens. *Arch Anatomie Physiol* 1905; 29: 252-79
40. East DJ. Stroke frequency, length and performance. *Swimming Technique* 1971; 8: 68-73
41. Eisele R, Köllmann F, Hutsteiner H, Simon G. Sauerstoffaufnahme während Fahrrad- und Laufbandergometrie. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 1996; 47(2): 54-60
42. Eriksson BO, Holmer I, Lundin A. Physiological effects of training in elite swimmers. In: Eriksson BO, Furberg B, eds.: *Swimming medicine IV*, Baltimore, MD, University Park Press 1978: 177-187
43. Faulkner JA. Physiology of swimming and diving. In: Falls HB, eds.: *Exercise Physiology*, New York: 1968: 415-66
44. Foxdal P, Sjodin A, Ostman B. The effect of different blood sampling sites and analyses on the relationship between exercise intensity and 4,0 mmol/L blood lactate concentration. *Eur J Appl Physiol* 1991; 63: 52-54

45. Gagnon M, Montpetit R. Technological development for the development of the center of volume in the human body. *J Biomech* 1981; 14: 235-241.
46. Ganong WF. *Review of Medical Physiology*. Appleton & Lange, Norwalk, CT 1993: 256
47. Gladden LB, Welch HG. Efficiency in anaerobic work. *J Appl Physiol* 1978; 44: 564-570
48. Goldsmith W. Measure what's measurable. *Swimming Tech* 1998; 35(2): 29-30
49. Grimstone SK, Hay JG. Relationships among anthropometric and stroking characteristics of college swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1986; 18: 60-68
50. Groot G de, Ingen Schenau GJ van. Fundamental mechanics applied to swimming: technique and propelling efficiency. In: Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K, eds.: *Swimming science V*. Champaign, Ill.: Human Kinetics 1988: 17-30
51. Hay JG, Guimaraes ACS, Grimston SK. A quantitative look at swimming biomechanics. *Swimming Technique* 1983; 20: 11-17
52. Heck H. Laktat in der Leistungsdiagnostik. Schorndorf: Hofmann 1991; 216-229
53. Helmut H. Anthropometric survey of young swimmers. *Anthropometrischer Anzeiger* 1980; 38: 17-34
54. Hermansen L, Ekblom B, Saltin B. Cardiac output during submaximal and maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 1970; 29: 82-86
55. Hollander AP, de Groot G, van Ingen Schenau GJ, Toussaint HM, Best H de, Peeters W, Meulemans A, Schreurs AW. Measurement of active drag forces during swimming. *J Sports Sci* 1986; 4: 21-30
56. Hollander AP, Groot G de, van Ingen Schenau GJ, Kahman R, Toussaint HM. Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. In: Ungerechts BE,

- Wilke K, Reischle K, eds.: *Swimming Science V*. Champaign: Human Kinetics 1988; 39-44
57. Hollmann H. *Sportmedizin*. Stuttgart: Schattauer 2000: 114, 132, 293, 316-318, 321, 364, 546
58. Holmer I. Oxygen uptake during swimming in man. *J Appl Physiol* 1972; 33: 502-509
59. Holmer I, Astrand PO. Swimming training and maximal oxygen uptake. *J Appl Phys* 1972; 33: 510-513
60. Holmer I, Stein EM, Saltin B, Ekblom B, Astrand PO. Hemodynamic and respiratory responses compared in swimming and running. *J Appl Physiol* 1974; 37: 49-54
61. Holmer I, Maximum oxygen uptake during swimming and running by elite swimmers. *J Appl Physiol* 1974; 36: 711-714
62. Holmer I. Physiology of swimming man. *Acta Physiol Scand Suppl.* 1974; 407: 1-55
63. Holmer I, Lundin A, Eriksson BO. Maximum oxygen uptake during swimming and running by elite swimmers. *J Appl Physiol* 1974; 36: 711-714
64. Holmer I, Haglund S. The Swimming flume: Experience and Applications. In: Eriksson B, Forsberg B, eds.: *Swimming Medicine IV*. University Park Press, Baltimore 1978; 78-81
65. Holmer I. Propulsive efficiency of breaststroke and freestyle swimming. *Europ J Appl Physiol* 1974; 33: 95-103
66. Holmer I. Efficiency of breaststroke and freestyle swimming. In: Clarys JP, Lewillie L, eds.: *Swimming II*. Baltimore: University Park Press 1975: 130-6
67. Hong SK, Cerretelli P, Cruz JC, Rahn H. Mechanics of respiration during submersion in water. *J Appl Physiol* 1969; 27: 535-538

68. Huijing PA, Hollander AP, Groot G de. Efficiency and specificity of training in swimming. *Biomechanics and medicine in swimming*. Champaign, Ill.: Human Kinetics 1983: 1-6
69. Huijing PA, Toussaint HM, Clarys JP. Active drag related to body dimensions. In: Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K, eds.: *Swimming science V.*, Human Kinetics Books. Champaign, Ill. 1988: 31-37
70. Ingen Schenau GJ van. Cycle power: a predictive model. *Endeavour* 1988; 12: 44-47
71. Ingen Schenau GJ van, Cavanagh PR. Power equations in endurance sports. *J Biomech* 1990; 23: 865-881
72. Jacobs I. Blood lactate: implications for training and sports performance. *Sports Med* 1986; 3: 10-25
73. Karpovich PV. Water resistance in swimming. *Res Q* 1993; 4: 21-8
74. Kasch FW. Maximal oxygen uptake in older male swimmers during free swimming and stationary cycling. In: Eriksson BO, Furberg B, eds.: *Swimming medicine IV*. Baltimore, University Park Press 1977; 143-146
75. Kellett DW, William PLT, Bagnall KM. A study of potential Olympic Swimmers. *B J Sports Med* 1978; 12: 87-92
76. Khosla T. Physique of female swimmers and divers from the 1976 Motreal Olympics. *J Am Med Assoc* 1984; 252: 536-537
77. König K, Reindell H, Keul J, Roskamm H. Untersuchungen über das Verhalten von Atmung und Kreislauf im Belastungsversuch bei Kindern und Jugendlichen im Alter von 10-19 Jahren. *Int Z Physiol* 1961; 18: 401
78. Kushmerick MJ. Energy balance in muscle contraction: a biochemical approach. *Curr Top Bioenerg* 1977; 6: 1-37

- 79.Lavoie JM, Montpetit RR. Applied Physiology of swimming. Sports Med 1986; 3: 165-189
- 80.Lavoie JM, Leger LA, Montpetit RR, Chabot S. Backward extrapolation of VO_2 from the O_2 recovery curve after a voluntary maximal 400m swim. In: Hollander, Huijing, de Groot, eds.: Biomechanics and medicine in swimming. Champaign: Human Kinetics 1983; 14: 222-227
- 81.Leger LA, Seliger V, Brassard L. Backward extrapolation of VO_{2max} from the O_2 recovery curve. Med Sci Sports Exerc 1980; 12: 24-27
- 82.Mader A, Liesen H, Heck H, Philippi H, Rost R, Schürch P, Hollmann W. Sportarzt u Sportmed 1976; 27: 80-88, 109-112
- 83.Mader A, Madsen O, Hollmann W. The evaluation of the anaerobic energy supply with regard to the performance in training and competition in swimming. Leistungssport 1980; 10: 263-279
- 84.Magel JR, Faulkner JA. Maximum oxygen uptakes of college swimmers. J Appl Phys 1967; 22: 929-933
- 85.Magel JR, McArdle W, Glaser R. Telemetered heart rate response so selected competitive swimming events. J Appl Physiol 1969; 26: 764-770
- 86.Margaria R, Cerretelli P, di Prampero PE, Massari C, Torelli G. Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. J Appl Physiol 1963; 18: 371-377
- 87.Margaria R, Cerretelli P, Mangili F. Balance and kinetics of anaerobic energy release during strenuous exercise in man. J Appl Physiol 1964; 19: 623-628
- 88.Mason B. Where are Races Won (and Lost)? Eds.: The Faculty of Education at The University of Edinburgh, Edinburgh. ISBS online Publication 1999
- 89.McArdle WD, Glaser RM, Magel JR. Metabolic and cardiorespiratory response during free swimming and treadmill walking. J Appl Phys 1971; 30: 733-738

90. McArdle WD, Magel JR, Delio DJ, Toner M, Chase JM. Specificity of run training on VO_2max and heart rate changes during running and swimming. *Med Sci Sports Exerc* 1978; 10: 16-20
91. Miller DI. Biomechanics of swimming. In: Wilmore JH, Koegh JF, eds.: *Exercise and Sport Sciences Review*, New York: 1975: 219-48
92. Montpetit RR, Leger LA, Lavoie JM, Cazorla G. VO_2 peak during free swimming using the backward extrapolation of the O_2 recovery curve. *Eur J Appl Phys* 1981; 47: 385-391
93. Montpetit RR, Lavoie JM, Cazorla G. Aerobic energy cost of swimming the front crawl at high velocity in international class and adolescent swimmers. In: Hollander, Huijijng, de Groot, eds.: *Biomechanics and medicine in swimming*. International Series on Sports Sciences 1983; 14: 228:234
94. Montpetit RR. Metabolic energy consumption as a function of speed and body size in male competitive swimmers. *Can J Appl Sport Sci* 1984; 9: 1219
95. Moody DL, Kollias J, Buskirk ER. Evaluation of Aerobic Capacity in Lean and Obese Women with Four Test Procedures. *J Sport Med* 1969; 1: 1
96. Morton RH. Comment on a model for calculation of mechanical power during distance running. *J Biomechanics* 1985; 18: 161-162
97. Nadel ER, Holmer I, Bergh U, Astrand PO, Stolwijk JAJ. Energy exchanges of swimming man. *J Appl Physiol* 1974; 36: 465-471
98. Nomura T. The influence of training and age on $\text{VO}_{2\text{max}}$ during swimming in Japanese elite age group and Olympic swimmers. In: Hollander AP, Huijijng PA, Groot de, eds.: *Biomechanics and Medicine in Swimming*. Champaign: Human Kinetics 1983; 14: 251-257

99. Novak LP, Bestit C, Mellerowicz H, Woodward W. Maximal oxygen consumption, body composition and anthropometry of selected Olympic male athletes. *J Sports Med Phys Fit* 1978; 18: 139-151
100. Orvel W, Ross L, Yancher P, Baer CL. Boat design and swimming performance. *Swimming Technique* 1981; 18: 38-44
101. Pansold B, Zinner J. Selection, analysis and validity of sportspecific and ergometric incremental test programmes. In: Bachl N, Graham TE, Löllgen H, eds.: *Advances in ergometry*. Berlin: Springer-Verlag 1991; 180-214
102. Pansold B, Zinner J. Die Laktat-Leistungskurve. In: Clasing D, Weiker H, Böning D, eds: *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag 1994; 47-64
103. Parizkova J, Buzkova P. Relationship between skinfold thickness measured by Harpenden caliper and densitometric analysis of total body fat in men. *Hum Biol* 1971; 43(1):16-21
104. Parizkova J, Buzkova P. La masse active, la graisse déposée et la constitution corporelle chez les sportifs de haut niveau. *Kinanthropologie* 1972; 4: 95
105. Pease D. Spotting Technique Faults - Below & Above the Water. Eds.: *The Faculty of Education at The University of Edinburgh, Edinburgh*. ISBS online Publication 1999
106. Pelayo P, Mujika I, Sidney M, Chatard JC. Blood lactate recovery measurements, training, and performance during a 23-week period of competitive swimming. *Eur J Appl Physiol* 1996; 74: 107-113
107. Pelayo P, Dekerie J, Delaporte B, Gosse B, Sidney M. Critical Speed & Critical Stroke Rate Could be Useful Physiological and Technical Criterial for Coaches to Monitor Endurance Performance in Competitive Swimmers. Eds.: *The Faculty of Education at The University of Edinburgh, Edinburgh*. ISBS online Publication 1999

108. Pendergast DR, di Prampero PE, Craig AB, et al. Quantitative analysis of front crawl in men and women. *J Appl Physiol* 1977; 43: 475-479
109. Pendergast DR, di Prampero PE, Craig AB, Rennie DW. Energetics of locomotion in man. In: Landry, Orban, eds.: *Exercise Physiology* 1978; 61-70
110. Prampero PE di, Peeters L, Margaria R. Alactic O₂ debt and lactic acid production after exercise in man. *J Appl Physiol* 1973; 34: 628-633
111. Prampero PE di, Pendergast DR, Wilson DW, et al. Energetics of swimming in man. *J Appl Physiol* 1974; 37:1-5
112. Prampero PE di, Cortili G, Magnani P, Saibene F. Energy cost of speed skating and efficiency of work against air resistance. *J Appl Phys* 1976; 40: 584-591
113. Prampero PE di, Pendergast DR, Wilson DW, Rennie DW. Blood lactic acid concentrations in high velocity swimming. In: Eriksson B, Fuhrberg B, eds.: *Swimming Medicine IV*. Baltimore: University Park Press 1978; 249-261
114. Prampero PE di. Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 1981; 89: 143-222
115. Prampero PE di. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 1986; 7: 55-72
116. Prampero PE di, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Giradis M, Zamparo P, Soule RG. Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol* 1993; 74: 2318-2324
117. Pyne D, Maw G, Goldsmith W. Protocols for the physiological assessment of swimmers. In: Gore C, editor. *Physiological tests for elite athletes*. Champaign: Human Kinetics 2000; 372-382

118. Reischle K. A kinematic investigation of movement patterns in swimming with photo-optical methods. In: Terauds J, Bedingfield EW, eds.: Swimming III, Baltimore 1979; 127-136
119. Rost R. Fahrradergometrische Belastungsuntersuchungen bei Herz-Kreislauf-Patienten. Köln: Echo Verlag 1990; 231-239
120. Saito M. The effect of training on the relationship among velocity, stroke rate and distance per stroke in untrained subjects swimming the breaststroke. Res Quart 1982; 53: 323-329
121. Salvadori G. Statura e peso die nuotatori. Nuoto 1983; 6: 33-34
122. Schleihau RE. A biomechanical analysis of freestyle. Swimming Technique 1974; 11:89-96
123. Schleihau RE. A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. In: Terauds J, Bedingfield EW, eds.: Swimming III. Baltimore: University Park Press 1979: 70-109
124. Schmidt B. unveröffentlicht
125. Simon G, Thiesmann M, Froberg U, Clasing D. Ergometrie im Wasser – eine neue Form der Leistungsdiagnostik bei Schwimmern. Dtsch Z Sportmed 1983; 34: 5-14
126. Simon G, Thiesmann M. Trainingssteuerung im Schwimmsport. Leistungssport 1986; 5: 45-47
127. Simon G. Laktat zur aeroben und anaeroben Leistungsdiagnostik im Schwimmen. In: Clasing D, Weiker H, Böning D, eds: Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag 1994; 81-87
128. Smith HK, Montpetit RR, Perault H. The anaerobic demands of backstroke swimming and its relation to body size, stroke technique, and performance. Eur J Appl Physiol 1988; 58: 182-188

129. Smith DJ, Norris SR, Hogg JM. Performance Evaluation of Swimmers. *Sports Med* 2002; 32(9): 539-554
130. Sprynarova S, Parizkova J. Comparison of functional, circulatory and respiratory capacity in girl gymnasts and swimmers. *J Sports Med Physic Fit* 1969; 9: 165-172
131. Spurgeon JH, Sargent RG. Measures of physique and nutrition on outstanding male swimmers. *Swimming Technique* 1978; 15: 26-32
132. Spurgeon JH, Giese WK. Physique of world-class female swimmers. *Scan J Sports Sci* 1984; 6: 11-14
133. Stager JM, Cordain L, Becker TJ. Relationships of body composition to swimming performance in female swimmers. *J Swim Res* 1984; 1: 21-26
134. Telford R. Lactic acid measurements: are they useful? *Sports Sci Med Q* 1984; 1: 2-7
135. Toussaint HM, van der Helm FCT, Elzerman JR. A power balance applied to swimming. In: Hollander AP, Huijing PA, de Groot G, eds.: *Biomechanics and medicine in swimming*. Champaign, Ill.: Human Kinetics 1983: 165-172
136. Toussaint HM, Meulemans A, de Groot G, Hollander AP, Schreurs AW, Vervoorn K. Respiratory valve of oxygen uptake measurements during swimming. *Eur J Appl Physiol* 1987; 56: 363-366
137. Toussaint HM, de Groot G, Savelberg HHCM, Vervoorn K, Hollander AP, Ingen Schenau GJ van. Active drag related to velocity in male and female swimmers. *J Biomech* 1988; 21: 435-438
138. Toussaint HM, de Groot G, Hollander AP. Measurement of efficiency in swimming man. In: Ungerechts BE, Reischle K, Wilke K, eds.: *Swimming science V*. Champaign, Ill.: Human Kinetics, 1988: 45-52
139. Toussaint HM, Beelen A, Rodenburg A. Propelling efficiency of front crawl swimming. *J Appl Physiol* 1988; 65: 2506-2512

140. Toussaint HM, Bruinink L, Coster R. Effect of triathlon wet suit on drag during swimming. *Med Sci Sports Exerc* 1989; 21: 325-328
141. Toussaint HM. Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1990; 22: 409-415
142. Toussaint HM, Knops W, de Groot G. The mechanical efficiency of front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc* 1990; 22: 402-408
143. Toussaint HM, de Looze M, van Rossem B. The effect of growth on drag in young swimmers. *J Sport Biomech* 1990; 6: 18-28
144. Toussaint HM. Difference in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1990; 22: 409-415
145. Toussaint HM, Janssen T, Kluft M. Effect of propelling surface size on the mechanics and energetics of front crawl swimming. *J Biomech* 1991; 24: 205-11
146. Toussaint HM, Beek PJ. Biomechanics of competitive front crawl swimming. *Sports Med* 1992; 13: 8-24
147. Toussaint HM, Hollander AP. Energetics of competitive Swimming. Implications for Training Programmes. *Sports Med* 1994; 18(6): 384-405
148. Ungerechts BE. Optimizing propulsion in swimming by rotation of the hands. In: Terauds J, Bedingfield EW, eds.: *Swimming III*. Baltimore: University Park Press 1988: 45-52
149. Ungerechts BE, Niklas A. Factors of Active Drag Estimated by Flume Swimming. In: Miyashita M, Mutoh Y, Richardson AB, eds.: *Paper presented at the Medicine and Science in Aquatic Sports* 1994; 39: 137-142
150. Ungerechts BE, Persyn U, Coleman V. Application of vortex flow formation to self-propulsion in water. In: Keskinen KL, Komi P, Hollander AP, eds.: *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*. Jyväskylä: Gummerus Printing House 1999: 95-100

151. Ungerechts BE, Persyn U, Colman V. Analysis of Swimming Technique using Vortex Traces. Eds.: The Faculty of Education at The University of Edinburgh, Edinburgh. ISBS online Publication 2000
152. Vaart AJM van der, Savelberg HHCM, de Groot G. An estimation of active drag in front crawl swimming. *J Biomech* 1987; 20: 543-546
153. Wakayoshi K, D'Acquisto LJ, Cappaert JM, Troup JP. Relationship between oxygen uptake, stroke rate and swimming velocity in competitive swimming. *Int J Sports Med* 1995; 16: 19-23
154. Webb PW. The swimming energetics of trout, 2: oxygen consumption and swimming efficiency. *J Exper Biol* 1971; 55: 521-540
155. Webb PW. Simple physical principles and vertebrate locomotion. *Amer Zool* 1988; 28: 709-725
156. Williams KR. The relationship between mechanical and physiological energy estimates. *Med Sci Sports Exercise* 1985; 17: 317-325
157. Zamparo P, Capelli C, Termin B, Pendergast DR, di Prampero PE. Effect of underwater torque on the energy cost and drag efficiency of front crawl swimming. *Eur J Appl Physiol* 1996; 73: 195-201

7. Anhang

7.1 Muster des Belastungsprotokolls

7.2 Muster der Einverständniserklärung

7.1

Testprotokoll OSP Kanalstudie

Hamburg, den . . .

ID:
 Name:
 Geburtsdatum:
 Größe: Gewicht: b.f.:
 BSA: LBM:
 ID-Laktat: Speicherplatz der Pulswerte:

Hauptschwimmart:

Bestzeiten: Freistil 100m 200m 400m
 (25m Bahn/50m Bahn)
 Punkte nach FINA-T:

6er/2er Beinschlag:
 Sprinter/Langstreckler:
 Trainingsjahre im Schwimmen:
 Trainingseinheiten (Wasser) pro Woche:

Test: 3 min. Belastung, 1 min. Pause

Zeit	v (m/s)	Laktat	HF	Frequenz	VO2	RQ	VE
Ruhe							
00:00							
Nachatmung 4 min.							
Nachatmung 7 min.							
Nachatmung 10 min.							

Abbruchgrund (allgemeine Erschöpfung, Atemprobleme, sonstige Gründe):

Einverständniserklärung

Hiermit erkläre ich,, mich damit einverstanden, an der Studie ‘Respiratorische Schwelle’ teilzunehmen.

Ich bin über die Risiken der geplanten Belastungsuntersuchungen aufgeklärt. Der Betreuer hat mir den Studienaufbau verständlich erklärt und noch bestehende Fragen zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Die Studie beinhaltet drei verschiedene Schwimmtests im Schwimmkanal, die mit Intensitäten von maximal 180 Herzschlägen pro Minute für bis zu drei Minuten geschwommen werden sollen. Dies entspricht einer normalen Ausbelastung, wie sie auch im Training erreicht wird.

Den Belastungsuntersuchungen im Schwimmkanal geht eine gründliche körperliche Untersuchung voraus.

Ich kann die Untersuchung jederzeit abbrechen, wenn ich mich aus körperlichen oder persönlichen Gründen nicht in der Lage sehe, die Belastung fortzusetzen. Ich kann dann auch auf meinen ausdrücklichen Wunsch aus der Studie ausscheiden.

Mir ist bekannt, dass die gewonnenen wissenschaftlichen Daten im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit verwendet und veröffentlicht werden. Die Veröffentlichung wird keine Daten enthalten, die irgendwelche Rückschlüsse auf meine Person zulassen, sie wird auch keine persönlichen Daten von mir enthalten.

Meine persönlichen Daten werden vorrangig aus organisatorischen Gründen erhoben, um später auch eine individuelle Aussage zu meinen Testergebnissen treffen zu können. Der Betreuer wird mir auf Wunsch meine persönlichen Testergebnisse erklären und trainingsrelevante Konsequenzen erläutern.

Unterschrift

Datum

Unterschrift eines Erziehungsberechtigten
(nur bei Sportlern unter 18 Jahren)

8. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die durch ihren Rat und ihre Unterstützung sowie durch ihre Teilnahme als Probanden zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Dazu zählen vor allem die Schwimmerinnen und Schwimmer des Gothenbourg Swim Club (Schweden) und der SG Hamburg, sowie die Mitarbeiter am Olympiastützpunkt Hamburg/Kiel.

Herzlich danken möchte ich auch den Trainern und Betreuern, die mir einen großen Teil des Wissens, daß in diese Arbeit eingeflossen ist, über viele Jahre vermittelt haben. Besonders erwähnen möchte ich Manfred Thiesmann, Glen Christiansen, Dr. Bodo Ungerechts, Prof. Dr. Gerit Simon und natürlich meine Eltern Sigrun und Dr. Günter Bremer. Sie alle haben mit viel Geduld und Einsatz meine sportliche, persönliche und wissenschaftliche Entwicklung gefördert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Braumann, Dr. Rüdiger Reer und dem gesamten Team am Institut für Sport- und Bewegungsmedizin der Universität Hamburg für die Bereitstellung des Themas, die Mithilfe bei der praktischen Durchführung und die wertvollen Anregungen und die sehr engagierte Betreuung. Besonders dankbar bin ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die hilfreichen Ratschläge.

Chris-Carol Bremer

9. Lebenslauf

Name Chris-Carol Bremer
Geburtstag 05.01.1971
Geburtsort Hannover
Familienstand ledig



Berufserfahrung

2002-heute Grünenthal, Aachen **Deutschland**
Projektleiter Analgetika, Strategisches Marketing
▪ verantwortlich für alle Aspekte der Kommerzialisierung neuer analgetischer Substanzen

2001 Genzyme Europe, Paris **Frankreich**
Analyst in Business Development (summer internship)
▪ Identifizierung und Evaluierung neuer Geschäftsbereiche

2000 Agnes Karll Krankenhaus, Laatzen **Deutschland**
Arzt im Praktikum
▪ Innere Medizin

Studium

2001 **INSEAD**, MBA Programme **Singapur/Frankreich**

1999/2000 **Praktisches Jahr**
Agnes Karll Krankenhaus, Laatzen (Innere Medizin) **Deutschland**
Michigan State University, Michigan (Orthopaedics and Sports Medicine) **USA**
Agnes Karll Krankenhaus, Laatzen (Chirurgie) **Deutschland**

1993-2000 **Studium der Humanmedizin** an der Medizinischen Hochschule Hannover **Deutschland**

1992-1994 **Michigan State University** **USA**
Major: Physiology, athletic scholarship, Dean's List 1992 -1993,
Academic All American

Sportliche und sonstige Aktivitäten

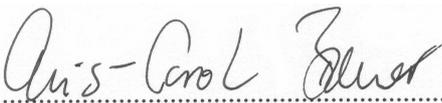
1992/1996 Mitglied der Deutschen Olympiamannschaft
1996 Mannschaftssprecher der Deutschen Olympischen Schwimm-Mannschaft
1992-2000 Medaillen -Gewinner bei Welt - und Europameisterschaften
1998-2000 Mitglied der gemeinsamen Anti -Doping-Kommission des NOK und Deutschen Sportbundes
1990-1992 Sportsoldat an der Sportschule der Bundeswehr in Warendorf

Chris-Carol Bremer
Aachen, den 15.11.2003

EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.


.....

