

U. Hoffmann¹, M. Smerecnik¹, M. Kusch¹, J. Klauck²

Leistungsphysiologische Forschungsansätze zum Flossenschwimmen

Exercise physiological research in fin swimming

1 Physiologisches Institut, Deutsche Sporthochschule Köln

2 Biomechanisches Institut, Deutsche Sporthochschule Köln

Zusammenfassung

Das Flossenschwimmen hat sich seit der Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelt und erlaubt dem Menschen eine schnelle und effiziente Fortbewegung im Wasser. Durch verschiedene Formen und Materialien wurde versucht, die Flossen zu optimieren und so den speziellen Anforderungen des Wettkampfsports und des Breitensports anzupassen. Im Wettkampfsport dominiert die Monoflosse, die besonders hohe Geschwindigkeiten ermöglicht. Im Breitensport hingegen wird versucht, durch Stereoflossen eine möglichst große Aktionsfreiheit zu schaffen. Bei typischer langsamer Fortbewegung ermöglichen diese eine Kraftübertragung, die als nicht belastend empfunden wird. Neben kaum untersuchten orthopädischen Problemen spielt die spezifische Leistungsdiagnostik eine wichtige Rolle in der leistungsphysiologischen und sportmedizinischen Forschung, denn gerade die spezifische Leistungsfähigkeit hat erhebliche Konsequenzen für die Sicherheit der Sporttaucher. Als weiteres Optimierungskriterium spielt die Effizienz und der damit verbundene Luftverbrauch eine Rolle bei der Auswahl der Flossen.

Schlüsselwörter: Flossenschwimmen, Leistungsdiagnostik, Tauchersicherheit

Einleitung

Im Breitensport hängen Sicherheit und Wohlbefinden beim Tauchen unmittelbar mit der effizienten Fortbewegung unter Wasser und an der Wasseroberfläche zusammen. Durch Flossen wird es auch dem ungeübten Schwimmer möglich, sich mit höherer Geschwindigkeit im Wasser zu bewegen, wie dies schon bei der Patentierung der Flossen in Deutschland 1938 (2) angekündigt wurde. Nach der ersten Patentierung hat es eine Reihe von Modellentwicklungen mit unterschiedlichen Zielen gegeben, mit dem Schwerpunkt, die Muskelkraft mit Hilfe der Flossen möglichst effektiv in Vortrieb umzusetzen.

Im breitensportlichen Tauchen findet man heute ausschließlich Stereoflossen, die dem Taucher die größte Aktionsfreiheit erlauben. Hier gibt es eine Reihe konstruktiver Merkmale, die je nach Einsatzzweck sowohl Vortrieb als auch eine bestmögliche Wendigkeit ermöglichen. Als Bewe-

Summary

Fin swimming has developed since the mid-20th century and enables people to move rapidly and efficiently in water. Various forms and materials have been used in an attempt to optimize the fins and adapt to special requirements of competitive sports and leisure sports. In competitive sports, mono-fins which make high speeds possible dominate. By contrast, stereo fins are used in leisure sports to achieve the greatest possible freedom of action. In typical slow movement, these enable power transmission which is not experienced as exertional. In addition to orthopedic problems which have hardly been studied, the specific performance diagnostics play an important role in exercise-physiological and sports-medical research, since particularly the specific performance capacity has considerable consequences for the safety of the leisure diver. Efficiency and the related air consumption also play a role in selection of the fins as an additional optimization criterion.

Keywords: Finswimming, Exercise testing, diving safety

gungsform dominiert der klassische Kraulbeinschlag, der Delphinbeinschlag wird im Vergleich zum Wettkampfsport selten angewendet. Im Mittelpunkt steht dabei die Entwicklung einer bequemen Flosse, die bei mäßigen Geschwindigkeiten optimal eingesetzt werden kann. Die Optimierung der Flossenmodelle, an der die Hersteller arbeiten, zielt daher auf einen Geschwindigkeitsbereich bis $0,5 \text{ m s}^{-1}$, wie er beim typischen Tauchgang vorkommt.

Durch Ausnutzung hydrodynamischer Gesetzmäßigkeiten soll eine möglichst optimale Kraftübertragung ermöglicht werden, so dass die langsame Fortbewegung als nicht belastend wahrgenommen wird. Allerdings kann mit einem normalen Tauchgang auch eine erhöhte physische Belastung verbunden sein (3), die noch durch die mit dem Tauchgang verbundenen Aktionen außerhalb des Wassers übertroffen wird. So erfordern eine Reihe von Situationen im Breitensport eine starke Vortriebserzeugung, wie z.B. das Schwimmen gegen eine starke Strömung, die Bewältigung von Di-

stanzen an der bewegten Wasseroberfläche mit kompletter Ausrüstung oder der Transport eines Tauchpartners an der Wasseroberfläche. Zwar kann der Tauchgang z.T. so geplant werden, dass die zu erwartende Beanspruchung für den Taucher eingegrenzt wird, dennoch erfordern viele attraktive Tauchziele eine erhöhte Leistungsfähigkeit. Damit wird das Flossenschwimmen zu einem wesentlichen Faktor der Tauchsicherheit im Breitensport. Daneben werden die Flos-



Abbildung 1: Monoflosse im wettkampfsportlichen Einsatz. Der Bewegungsablauf entspricht dem Delphinbeinschlag beim Schwimmen, das Flossenblatt ist aus elastischem Glasfasermaterial

sen im Wettkampfsport eingesetzt, wobei die Möglichkeit eines maximalen Kräfteinsatzes die herausragende Rolle spielt. Als Flossenform hat sich die Monoflosse durchgesetzt, die mit einem Delphinbeinschlag geschwommen wird (Abb. 1). Dabei kann die Rumpfmuskulatur unterstützend zur Vortriebserzeugung eingesetzt werden. Ein Vergleich mit Tiermodellen zeigt, dass diese Bewegungsform aufgrund der wellenförmigen Körperbewegung hydrodynamisch sehr günstig ist (9).

Eine weitere zweckorientierte Einsatzmöglichkeit ist die bereits frühzeitig erkannte Nutzung der Flossen im Rettungswesen (5). Unter leistungsphysiologischer Betrachtung spielt die effiziente Vortriebserzeugung zunächst bei der kontinuierlichen Fortbewegung eine wesentliche Rolle, da beim Tauchen der Luftverbrauch möglichst gering gehalten werden soll. Der Luftverbrauch korreliert wiederum mit der körperlichen Belastung, so dass eine erhöhte Effizienz einen verminderten Luftverbrauch induziert. Hier gibt es offenbar ein Geschwindigkeitsoptimum, wenn die O_2 -Aufnahme als korrelierende Größe der Ventilation herangezogen wird (8).

Orthopädisch-sportmedizinische Aspekte

Wie für jede zyklische Bewegungsform lassen sich unter sportmedizinischen Gesichtspunkten zwei Aspekte unterscheiden: Die mechanische Belastung für den Bewegungsapparat und die Energieversorgung bei den verschiedenen Belastungszeiten. Besonders beim Flossenschwimmen mit der Monoflosse sind die Belastungen der Rumpfmuskulatur und der Wirbelsäule sehr hoch. So berichten *Verni et al.* (11) auch über Schmerzzustände im Lumbalbereich bei Flossenschwimmern. Eine gezielte muskuläre Kräftigung durch

gymnastische Übungen sollte daher auch zum Training der Flossenschwimmer gehören und nicht nur im Wettkampfsport stattfinden. Ein Vergleich zu Problemen der Delphinschwimmer liegt nahe, jedoch ist zu bedenken, dass einerseits die auftretenden Kraftmaxima durch den Flosseneinsatz wesentlich größer sein dürften und andererseits Unterschiede im Bewegungsablauf vorliegen. So sind die Bewegungsamplituden im Vergleich zum Delphinbeinschlag ohne Flossen wesentlich geringer, während für eine optimale Geschwindigkeit sehr hohe Schlagfrequenzen (bis 3 Hz) eingesetzt werden (1). Unter präventiven Gesichtspunkten ist der Einsatz der Monoflossen in Kindes- und Jugendalter im Wettkampfsport strikt begrenzt (10).

Diese orthopädischen Probleme lassen sich aber im wesentlichen auf den Wettkampfsport beschränken, da weder die Monoflosse noch die Delphinbeinschlagbewegung im Breitensport eine besondere Bedeutung haben. Vergleichbare Berichte über Probleme im Wirbelsäulenbereich, die aus dem Kraulbeinschlag resultieren, liegen nicht vor.

Unter orthopädischen Gesichtspunkten lassen sich noch an einer anderen Stelle Probleme vermuten, die sowohl im Breiten- als auch im Wettkampfsport auftreten könnten: Die Kraftübertragung findet ausschließlich über den in einer Plantarflexion befindlichen Fuß statt, wobei es bei der entscheidenden Schlagbewegung noch zu einer passiven Dehnung kommt. Eine systematische Schädigung im Wettkampfsport ist aber nicht nachgewiesen und wird auch aus dem Breitensport nicht berichtet.

Wesentlich häufiger, besonders relevant aber in der medizinischen Praxis im Wettkampfsport (6), sind Probleme durch die eng anliegende Flosse. Oft resultieren hieraus Durchblutungsprobleme im Fußbereich. Dies ist auch ein Aspekt, der die Qualität einer Flosse kennzeichnet und erheblich vom Material abhängt. Ebenfalls wird für den Breitensportlichen Taucher die Belastung des Flossenschwimmers – zumindest zu Beginn – sehr ungewohnt sein und nicht selten zu Muskelkrämpfen im Waden- und Fußbereich führen.

Ein Ausgleichstraining dürfte eine Möglichkeit der Vorbeugung sein (4), obwohl bisher systematische wissenschaftliche Studien hierzu nicht vorliegen.

Leistungsdiagnostische sportmedizinische Aspekte

Im Mittelpunkt der wenigen Untersuchungen über das Flossenschwimmen steht der Energieumsatz. Die Abschätzung des Energiebedarfs mit Hilfe der Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) spielt unter verschiedenen Aspekten eine ganz besondere Rolle (8). Hierbei wird stillschweigend die enge Korrelation zwischen $\dot{V}O_2$ und Ventilation vorausgesetzt, denn bei Sporttauchern begrenzt der Luftverbrauch die Tauchzeit.

Pendergast et al. (8) bestimmten den O_2 -Verbrauch pro zurückgelegter Strecke mit einem Druckluftgerät. Abbildung

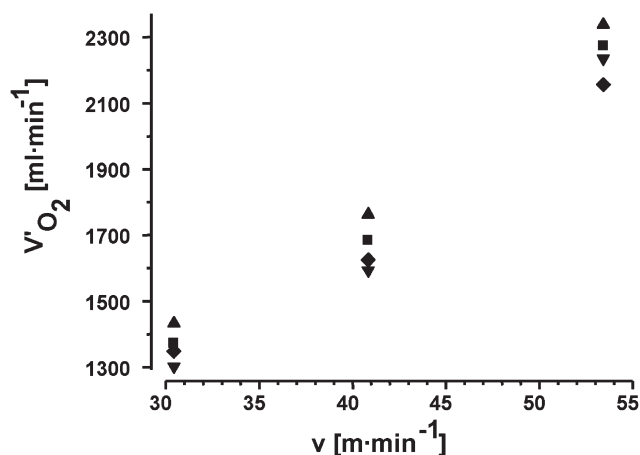


Abbildung 2: Sauerstoffverbrauch ($\dot{V}O_2$) bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und verschiedenen Schwimmlagen (modifiziert nach Pendergast et al. 1996). Die Differenzen in der $\dot{V}O_2$ lassen sich durch unterschiedliche Strömungswiderstände erklären. Horizontale Lage bis sehr stark angestellte Lage (bis 35°)

2 zeigt die Daten in der Geschwindigkeits- $\dot{V}O_2$ -Beziehung. Der Spitzenwert wird bei 53,4 m·min⁻¹ mit etwa $\dot{V}O_2=2,3$ l·min⁻¹ erreicht. Dabei spielt offenbar die Schwimm Lage eine erhebliche Rolle. Im Sporttauchen wird die Schwimm Lage unmittelbar durch die Trierung beeinflusst. Im Idealfall lässt ein Kräfte- und Momentengleichgewicht zwischen den verschiedenen am Taucher wirkenden Auf- und Abtriebskräften einstellen. Wichtigster Faktor ist hierbei die angemessene Verwendung von zusätzlichem Ballast zur Kompensation des Auftriebes des Kälteschutzes. Hier können bis über 10% der $\dot{V}O_2$ eingespart werden.

Die Studie von Pendergast et al. (8) legt aber auch nahe, dass der Unterschied bei der Verwendung unterschiedlicher Flossentypen nur marginal ist. Eigene Untersuchungsergebnisse, die allerdings nicht durch Messung der $\dot{V}O_2$ sondern durch Herzfrequenzmessungen erzielt wurden (Abb. 3), geben allerdings Anlass dazu, den Einfluss verschiedener Flossentypen auf die Sauerstoffaufnahme weiter kritisch zu untersuchen. 16 verschiedene Flossenmodelle wurden von drei Probanden bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten erprobt. Die Variationsbreite der mittleren Herzfrequenzen ist erheblich, sodass hieraus schon unterschiedliche metabolische Belastungen zur Erreichung einer bestimmten Tauchgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Flossentypen festgestellt werden können. Rückschlüsse auf die hydrodynamische Wirksamkeit der Flosse und damit auf den unmittelbaren Nutzen für den Taucher sind weiterhin schwierig, tendenziell jedoch zu erkennen.

Für die Konstruktion von Kreislaufgeräten (Rebreather), die in den letzten Jahren Einzug im Sporttauchen gehalten haben, stellt die Abschätzung der $\dot{V}O_2$ des Tauchers einen Aspekt für dessen Sicherheit dar. Die Zumischung an Frischgas, das bis zu 50% O_2 enthält, soll einerseits sparsam erfolgen und andererseits den notwendigen O_2 -Bedarf abdecken. Anders als bei Geräten mit 100%- O_2 , wie sie im militärischen Bereich eingesetzt werden, aber nur geringe Tauchtiefen erlauben, kann es bei diesen halb-offenen Systemen

durchaus zu einem O_2 -Mangel kommen, da die Menge an zugeführtem O_2 konstruktionsbedingt begrenzt ist. Ein besonderes Gefährdungsmoment ist hier nahe der Oberfläche gegeben, wenn der O_2 -Partialdruck deutlich abnimmt.

Für leistungsdiagnostische Untersuchungen ist die besondere Bewegungsform beim Flossenschwimmen zu beachten. Neben dem 'angebundenen Schwimmen' (tethered swimming) gegen einen Widerstand (12), wird der Strömungskanal (7) oder auch das freie Schwimmen eingesetzt. Klassische spirometrische Verfahren zur Bestimmung des Gasaustausches bedürfen aufgrund der besonderen Anwendungsbedingungen unter Wasser einer spezifischen Adaptation und werden deshalb nur selten unter Feldbedingungen eingesetzt.

Das angebundene Schwimmen ist allenfalls begrenzt anwendbar, da für die Rückstellung des Flossenblattes in eine Position, die Vortrieb ermöglicht, die Strömung unmittelbar genutzt wird. Außerdem bleibt die Rolle des Körperwiderstandes unberücksichtigt. Für die leistungsdiagnostische An-

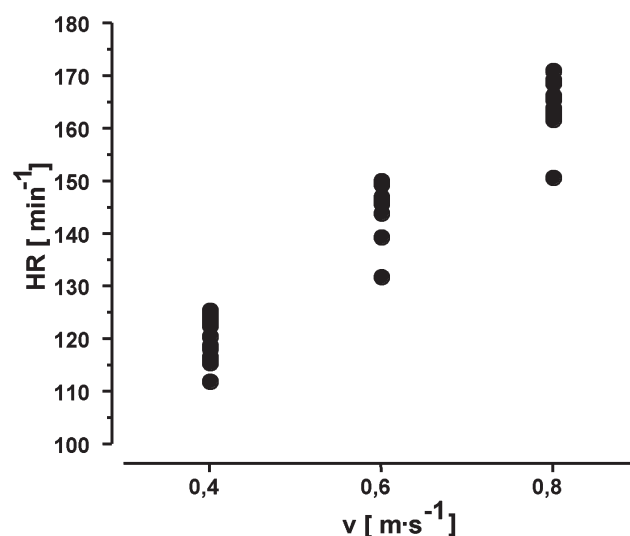


Abbildung 3: Herzfrequenz (HR) bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und verschiedenen Flossentypen. Dargestellt sind jeweils Mittelwerte von drei Probanden.

wendung wäre dieser Ansatz aber sicherlich hinreichend. Niklas/Peter verwenden die Kombination aus Schwimmen gegen die konstante Strömung und zusätzlichem Zuggewicht für einen Leistungstest (7). Diese Art des Tests ist sicherlich hinreichend geeignet für eine eingeschränkte Leistungsdiagnostik des Tauchers. Das 'Gesamtsystem' mit passivem Widerstand und aktiven Antriebshilfen kann aber letztendlich nur beim freien Schwimmen oder in der Kombination des tethered swimming mit einem Schwimmkanal, wie Niklas/Peter es beschreiben, ermittelt werden. Neben der logistischen Herausforderung der Nutzung eines Schwimmkanals kommt noch ein erheblicher messtechnischer Aufwand zur Analyse des Gasaustausches beim freien Schwimmen hinzu. Beide Ansätze können daher nur im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchung eine Rolle spielen, sind aber eben nicht für routinemäßige Untersuchungen der Sporttaucher geeignet.

Drei Anwendungsbereiche derartiger Untersuchungen können also unterschieden werden:

- Diagnose und Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Tauchers auch im Sinne der technischen Verbesserung des Bewegungsablaufes
- Optimierung der Antriebshilfen, insbesondere durch Verbesserung der Flosseigenschaften
- Reduktion des Körperwiderstandes durch Anpassung und richtige Anwendung der Ausrüstung

Die Leistungsfähigkeit des Tauchers ist ein wesentlicher Aspekt hinsichtlich der Tauchsicherheit. So gehört die Beurteilung der allgemeinen körperlichen Leistungsfähigkeit durchaus auch zur medizinischen Beurteilung der Tauchtauglichkeit. Nachteilig ist allerdings, dass dies mit einem unspezifischen fahrradergometrischen Verfahren untersucht wird und die spezifische Form der Fortbewegung unberücksichtigt bleibt. Mittelbare Ansätze, etwa im Rahmen der taucherischen Ausbildung durch einen Streckentest, bleiben undifferenziert in Hinblick auf die körperliche Leistungsfähigkeit, den passiven Widerstand durch die Ausrüstung und die Effizienz der Flossen. Gerade hier besteht ein besonderer sportmedizinischer Handlungsbedarf.

Literatur

1. *Choumkov A*: Use of control in the preparation of fin swimmers, in: Kerll KH: Fin swimming manual. Verlag Stefanie Naglschmid, Stuttgart, 1989, 82-90.
2. *de Corlieu LM*: Schwimmhilfegerät zum Schwimmen nach dem Kraulstil. Patentschrift Nr. 658872, Reichspatentamt (1938).
3. *Hoffmann U, Leyk D, Smerecnik M*: Herzfrequenz als Beanspruchungsindikator beim Sporttauchen, in: Tirpitz, Schipke, van Laak (Hrsg): Tauch- und Überdruckmedizin 6. Dr. Curt Haefner Verlag GmbH, Heidelberg, 2000, 131-139.
4. *Hoffmann U*: Sporttauchen zwischen Breiten- und Leistungssport, in: Ehm OF, Hahn M, Wenzel J (Hrsg): Tauchen noch sicherer. Müller Rüschi-kon Verlags GmbH, Cham, 1999, 348-367.
5. *Jung M*: Das Handbuch der Tauchgeschichte – Techniken, Geräte, Berufe, Erfindungen. Verlag Stefanie Naglschmid, Stuttgart, 1999.
6. *Kienle KH*: Wettkampfspezifische medizinische Probleme beim Tauchsport, in: Roggenbach HJ: Tauchmedizinische Fortbildung – Band 1, Seminarbeiträge zur Tauchmedizin. Verlag Stefanie Naglschmid, Stuttgart, 1991, 60-164.
7. *Niklas A, Peter E*: Verfahren und Vorrichtung zur tätigkeitsspezifischen Leistungsdiagnostik für Schwimmtaucher, in: Bartmann H: Taucher-Handbuch. ecomed Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg/Lech, 9. Erg.-Lfg. 1993, 99-106.
8. *Pendergast DR, Tedesco RM, Nawrocki DM, Fisher NM*: Energetics of underwater swimming with SCUBA. Med Sci Sports Exerc 28 (1996) 573-580.
9. *Triantafyllou MS, Triantafyllou GS*: Effizienter Flossenantrieb für einen Schwimmroboter. Spektrum der Wissenschaft 8 (1995) 66-73.
10. *Verband Deutscher Sporttaucher e.V. (VDST)*: Jugendwettkampfordnung, 1997.
11. *Verni E, Prosperi C, Lucaccini C, Fedele L, Beluzzi R, Lubich T*: Lumbar pain and fin swimming. J Sports Med Phys Fitness 39 (1999) 61-65.
12. *Yamaguchi H, Shidara F, Naraki N, Mohri M*: Maximum sustained fin-kick thrust in underwater swimming. Undersea Hyperbaric Med 22 (1995) 241-248.

Korrespondenzadresse

Dr. Uwe Hoffmann
Deutsche Sporthochschule Köln
Physiologisches Institut
50927 Köln
Fax: 0221 – 49 82 679
E-Mail: HOFFMANN@DSHS-KOELN.DE