

Trainerhandmaterial

Titel: Physikalische Grundlagen – Wende

Erarbeitet von: Dr. Jürgen Küchler

Institut für Angewandte Trainingswissenschaft
Fachbereich Ausdauer
Fachgruppe Schwimmen

Institut für Angewandte Trainingswissenschaft
Ein Institut im Verein IAT/FES e. V.
Marschnerstr. 29
04109 Leipzig

Telefon +49 (0)341 4945-197
Fax +49 (0)341 4945-400
E-Mail kuechler@iat.uni-leipzig.de
Web <http://www.sport-iat.de>

Gefördert durch:



Bundesministerium
des Innern

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	4
2	Phaseneinteilung des Wendeabschnitts.....	4
2.1	Zeit eines Wendeabschnitts	5
2.2	Adaption	6
2.3	Drehung	7
2.3.1	Impuls und Kraft	8
2.3.2	Drehimpuls und Drehmoment	9
2.4	Abstoß.....	12
2.4.1	Antrieb und Widerstand.....	12
2.4.2	Arbeit und Leistung	13
2.5	Übergang	15
2.5.1	Wasserwiderstand und Tauchtiefe	15
2.5.2	Gleiten.....	16
2.5.3	Delfinbewegung.....	17
2.5.4	Antriebsvarianten bei der Brustwende.....	18
3	Zur Optimierung des Bewegungsablaufs	19
4	Literatur.....	19

1 Einführung

In der Literatur finden sich wenige Beispiele zu einer Analyse des Wendeabschnitts unter Berücksichtigung grundlegender mechanischer Gesetzmäßigkeiten. Die Mehrzahl der Autoren beschränkt sich auf eine bildliche Darstellung von Details zum Bewegungsablauf (Counsilman, 1980; Schramm, 1987; Maglischko, 2003) oder verwendet statistische Verfahren zur Bestimmung leistungsrelevanter Parameter (Chow, Hay, Wilson & Imel, 1984; Guimares & Hay, 1985).

Im Folgenden werden einige für den Bewegungsablauf im Wendeabschnitt grundlegende mechanische Aspekte und ein einfacher mathematischer Algorithmus zur Berechnung der Wendezeit dargestellt. Die abgeleitete analytische Funktion der Wendezeit ermöglicht eine solide Abschätzung der Auswirkungen von Stärken und/oder Schwächen des einzelnen Athleten auf die Wendezeit.

2 Phaseneinteilung des Wendeabschnitts

Der Wendeabschnitt kann für alle Schwimmdisziplinen in vier Phasen gegliedert werden (Pfeifer, 1991; Kuchler, 1998; Wilke & Daniel, 2000): Adaptation, Drehung, Abstoß und Übergang. In Tabelle 1 sind Definition und Zielstellungen für diese vier Phasen zusammengefasst.

Tab. 1. *Definition und Zielstellung der Wendephasen nach Dietze & Saborowski (2005)*

Wendenphase	Definition	Zielstellung
Adaptation	Beginnt mit der Antizipation zur Richtungsumkehr und endet mit dem Verlassen der zyklischen Bewegung in der jeweiligen Schwimmart in der Gesamtkoordination	Sicherung optimaler Bedingungen für die nachfolgende Drehung durch Variation der Zyklusparameter (Halten des Niveaus der Schwimmgeschwindigkeit) und Einnahme der günstigsten Ausgangsposition für die Drehung (unter Berücksichtigung der Wettkampfbestimmungen)
Drehung	Beginnt mit dem Verlassen der zyklischen Bewegung in der Gesamtkoordination und endet mit dem Setzen der Füße an der Wand	Minimieren der Zeit für die Richtungsumkehr und Vorbereitung eines kraftvollen Abstoßes
Abstoß	Beginnt mit dem Setzen und endet mit dem Lösen der Füße an bzw. von der Beckenwand	Maximale Beschleunigung des Körpers in Schwimmrichtung in optimal kurzer Zeit
Übergang	Beginnt mit dem Lösen der Füße von der Wand und endet mit dem Einsatz der zyklischen Bewegung in der jeweiligen Schwimmart in Gesamtkoordination unter Einhaltung der Wettkampfbestimmungen	Minimieren des Geschwindigkeitsverlusts in der Schwimmrichtung und Mitnahme einer hohen Geschwindigkeit in die zyklische Bewegung der Schwimmart in Gesamtkoordination

Aufgrund von Festlegungen, die in den Wettkampfregeln zur Bewegungsausführung der Wenden beschrieben sind, können in Bezug auf die Richtungsumkehr zwei Techniken unterschieden werden:

- Richtungsumkehr mit Handkontakt an der Beckenwand,
- Richtungsumkehr ohne Handkontakt an der Beckenwand.

Die verschiedenen, in der Literatur beschriebenen „Techniken“, können diesen zwei Grundtypen zugeordnet werden. Im deutschen Sprachraum wird die Mehrzahl der verschiedenen Varianten unter zwei Kurznamen zusammengefasst:

- Kippwende: Richtungsumkehr mit Handkontakt
- Rollwende: Richtungsumkehr ohne Handkontakt

Im folgenden Abschnitt werden diese zwei Grundtypen aus mechanischer Sicht analysiert.

2.1 Zeit eines Wendeabschnitts

Für die Berechnung einer Wendezeit ist es zweckmäßig Grenzen für den Wendeabschnitt festzulegen. Unter Berücksichtigung der Wettkampfbestimmungen, in denen Grenzen für die Länge der Übergänge festgelegt sind, soll der Wendeabschnitt von 5 m vor der Beckenwand bis 15 m nach der Beckenwand lang sein. Bei der Wahl dieser Grenzen muss in Ergänzung zu der Phaseneinteilung aus Tabelle 1 ein fünfter Abschnitt, die zyklische Bewegung in der Schwimmar, berücksichtigt werden. Damit ergeben sich für Kipp- und Rollwende in Bezug auf Beginn und Ende der einzelnen Phasen dieses Wendeabschnitts die in den Tabellen 2 und 3 zusammengefassten Sachverhalte.

Tab. 2. Phaseneinteilung bei der Kippwende

Phase	Beginn	Ende
Adaptation	Kopfdurchgang bei 5 m vor der Wand	Anschlagen der Hände
Drehung	Anschlagen der Hände	Setzen der Füße
Abstoß	Setzen der Füße	Lösen der Füße
Übergang	Lösen der Füße	Beginn der zyklischen Bewegung in der jeweiligen Schwimmar
Zyklische Bewegung	Beginn der zyklischen Bewegung in der jeweiligen Schwimmar	Kopfdurchgang bei 15 m nach der Wand

Tab. 3. Phaseneinteilung bei der Rollwende

Phase	Beginn	Ende
Adaptation	Kopfdurchgang bei 5 m vor der Wand	Beginn der Nickbewegung des Kopfes
Drehung	Beginn der Nickbewegung des Kopfes	Setzen der Füße
Abstoß	Setzen der Füße	Lösen der Füße
Übergang	Lösen der Füße	Beginn der zyklischen Bewegung in der jeweiligen Schwimmar
Zyklische Bewegung	Beginn der zyklischen Bewegung in der jeweiligen Schwimmar	Kopfdurchgang bei 15 m nach der Wand

Unabhängig von diesen Grenzen ist die Zeit für den gesamten Wendeabschnitt Δt_w bei allen Varianten der zwei Wendentypen die Summe der Teilzeiten der fünf Abschnitte Adaptation (Δt_{adap}), Drehung (Δt_d), Abstoß (Δt_{abst}), Übergang ($\Delta t_{\ddot{u}}$) und zyklischer Bewegung (Δt_{zyk}):

$$\Delta t_w = \Delta t_{adap} + \Delta t_d + \Delta t_{abst} + \Delta t_{\ddot{u}} + \Delta t_{zyk} \quad (1)$$

Wenn ein Schwimmer den Übergang bis zur erlaubten Grenze (15 m) ausführt, gilt $\Delta t_{zyk} = 0$. Diese Fälle sind in der Tendenz zunehmend im Schmetterlings- und Rückenschwimmen

bzw. beim Lagenübergang von Schmetterling nach Rücken zu beobachten, weil Schwimmer, die eine hohe Abstoßgeschwindigkeit erzielen und die Delfinbewegung auf hohem Niveau beherrschen, in den Übergängen deutlich höhere Geschwindigkeiten als im Schmetterlings- bzw. Rückenschwimmen erzielen (Abb. 1).

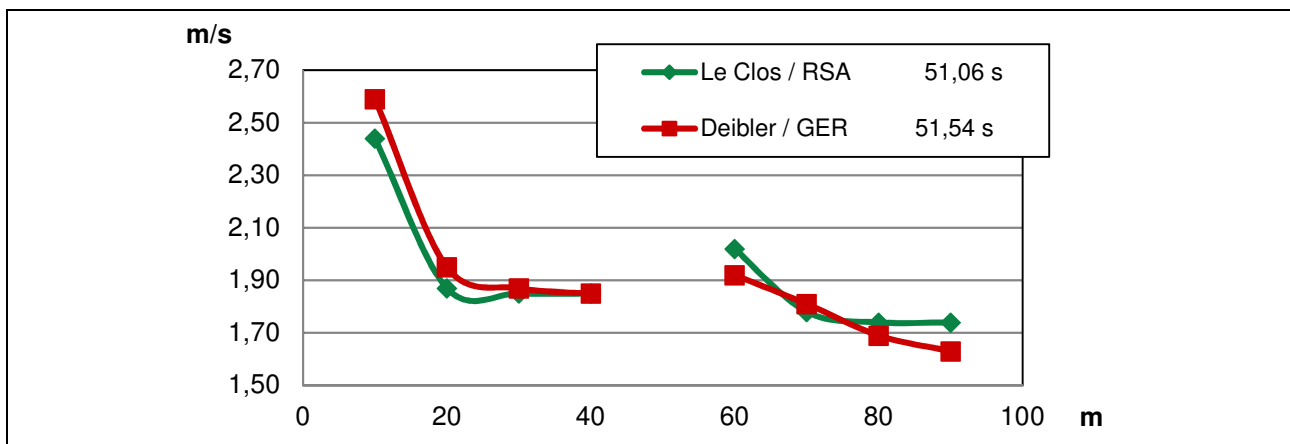


Abb. 1. Verlauf der Geschwindigkeit über 100 m Schmetterling der Männer (WM-Finale 2013)

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der mittleren Schwimgeschwindigkeit (Mittelwert für 10-m-Abschnitte entsprechend der Leinenmarkierungen) vom Weltmeister über 100 m Schmetterling der Männer Chad Le Clos/RSA (Südafrika) und dem besten deutschen Schwimmer Steffen Deibler (Platz 4 im Finale der WM 2013).

2.2 Adaption

Die Qualität der Adaption wird wesentlich davon bestimmt, wie es dem Schwimmer oder der Schwimmerin gelingt, die Beckenwand optimal zu antizipieren (die Drehung im richtigen Abstand zur Wand zu beginnen) und gleichzeitig das Niveau der Geschwindigkeit aufrecht zu erhalten. Korrekturen durch Variation der Zyklusparameter, die zur Sicherung eines optimalen Anschlags notwendig sind, sollten zwei bis drei Zyklen vor Beginn der Drehung ausgeführt werden, um mit einem stabilen Bewegungsablauf im letzten Zyklus einen gleichbleibenden Auftakt für eine schnelle Drehung zu sichern. Die Zeitdauer der Adaption Δt_{adap} ist der Quotient aus dem zurückgelegten Weg Δs_{adap} und der dabei realisierten mittleren Geschwindigkeit v_{adap} :

$$\Delta t_{adap} = \frac{\Delta s_{adap}}{v_{adap}} \quad (2)$$

Für den während der Adaptionszeit zurückgelegten Weg gilt: $\Delta s_{adap} = 5m - s_{dr}$, wobei s_{dr} der Abstand zur Beckenwand ist, bei dem der Schwimmer die Drehung beginnt.

Bei den Varianten der Kippwende (Brust, Schmetterling und Lagenübergänge) darf die Drehung erst begonnen werden, nachdem die Beckenwand mit einer bzw. beiden Händen berührt wurde (Abb. 2).



Abb. 2. Abstand zur Beckenwand am Beginn der Drehung bei der Kippwende

Bei der Rollwende (Kraul, Rücken) wird die Drehung um die Körperbreitenachse in größerem Abstand zur Beckenwand begonnen (vgl. Abb. 3). Deshalb ist der in der Adaptationszeit zurückgelegte Weg ca. einen halben Meter kürzer als bei der Kippwende.



Abb. 3. Abstand zur Beckenwand am Beginn der Drehung bei der Rollwende

Die Strecke s_{dr} ist abhängig von der Anatomie des Athleten (Kippwende: Armlänge bzw. Rollwende: Beinlänge) und bei der Rollwende auch von der Geschwindigkeit in der zyklischen Bewegung der Schwimmart. Denn je höher die Geschwindigkeit in der zyklischen Bewegung ist, umso größer muss der Abstand zur Wand gewählt werden, weil der Schwimmer während der Drehung (bei gleicher Drehzeit) einen längeren Weg in Richtung Wand zurücklegt. Beide Sachverhalte sollten bei Vergleichen zwischen verschiedenen Schwimmern berücksichtigt werden.

2.3 Drehung

Die Dauer der Drehphase t_d ist wesentlich davon abhängig, inwieweit es dem Schwimmer oder der Schwimmerin gelingt, einen möglichst großen Teil des Impulses bzw. der Bewegungsenergie aus der Translation in die Rotation „mitzunehmen“ und äußere Kräfte (Wasserwiderstand, Stützkräfte an der Beckenwand) in Verbindung mit einer zweckmäßigen Koordination von Teilkörperbewegungen (Trägheitskräfte) für einen schnellen Richtungswechsel zu nutzen.

2.3.1 Impuls und Kraft

Impuls und Masse sind physikalische Parameter für die Beschreibung einer Translationsbewegung. Der **Impuls** I eines Körpers ist das Produkt aus der Masse m des Körpers und der Geschwindigkeit seines KSP v_{KSP} :

$$I = m * v_{KSP} \quad (3)$$

Entsprechend des zweiten Newtonschen Axioms ist der zeitliche Mittelwert der resultierenden **Kraft** F_R , die am KSP angreift, der Quotient aus der Änderung des Impulses ΔI und des Zeitintervalls Δt , in dem die Kraft F_R auf den Körper eingewirkt hat:

$$F_R = \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (4)$$

Bei der Mehrzahl der Antriebssituationen im Sport ist die Masse m eine zeitlich konstante Größe, sodass sich die Änderung des Impulses durch eine Änderung der Geschwindigkeit Δv_{KSP} beschreiben lässt:

$$F_R = \frac{m * \Delta v_{KSP}}{\Delta t} \quad (5)$$

Je größer die Änderung der Geschwindigkeit und je kürzer das Zeitintervall, in dem diese Änderung passiert, umso größer ist die einwirkende Kraft, die die Änderung der Geschwindigkeit bewirkt. Diese allgemeine Aussage spielt auch für die Ausführung der Drehung bei der Kippwende eine wesentliche Rolle.

Abbildung 4 zeigt die Körperposition eines Schwimmers am Beginn der Drehung (beim Anschlagen der Hände). Auf den Schwimmer wirken zwei äußere Kräfte: die Handkraft F_H (beim Stütz an der Wand) und der Wasserwiderstand F_W (am KSP als resultierende Größe aus der Gesamtheit der Wechselwirkung mit dem Wasser).

Mit dem Anschlagen der Hände (am Beginn der Drehung) ist der Schwimmer nahezu gestreckt und hat eine Geschwindigkeit, die annähernd der Zyklusgeschwindigkeit in der jeweiligen Schwimmart am Ende der Bahn entspricht. In Bezug auf den nachfolgenden Bewegungsablauf können in Wettkampf und Training verschiedene Varianten beobachtet werden. Nachfolgend werden zwei Varianten miteinander verglichen:

- Variante 1: Der Schwimmer bleibt weiterhin gestreckt.
- Variante 2: Der Schwimmer hockt die Knie schnellkräftig zur Brust.

Bei Variante 1 beugt der Schwimmer nach dem Handkontakt lediglich im Ellenbogengelenk. Da der Körper nahezu gestreckt bleibt, bewegt sich der KSP am Beginn des Stützes nur noch wenig in Richtung Beckenwand. Daraus folgt: v_{KSP} verringert sich drastisch bzw. Δv_{KSP} ist sehr groß, d. h. ein großer Teil des Impulses aus der Translation wird im Stütz an der Beckenwand „vernichtet“: $\Delta I = m * \Delta v_{KSP}$.

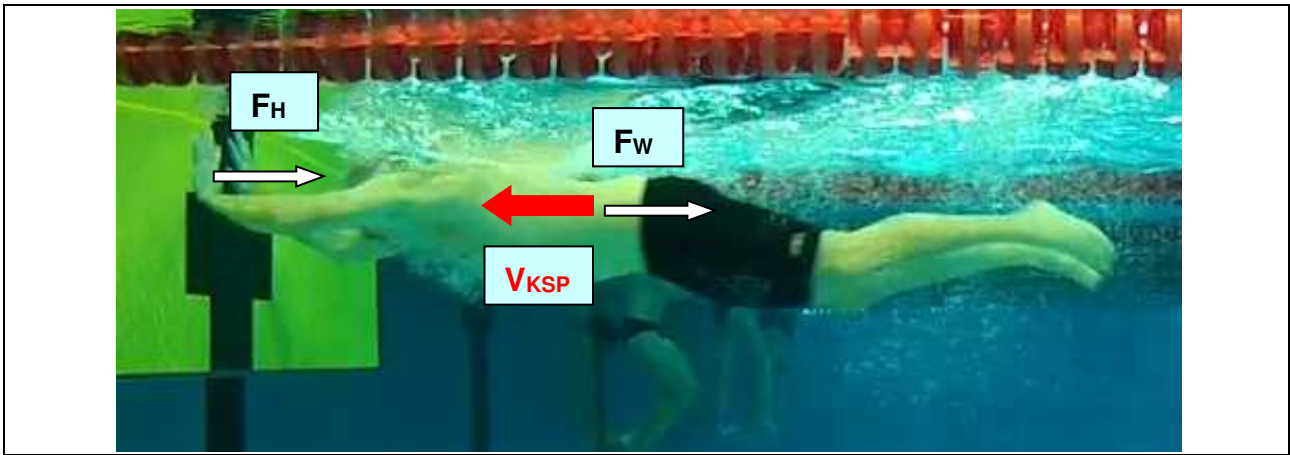


Abb. 4. Am Beginn der Drehung wirkende Kräfte

Bei Variante 2 werden die Beine des Schwimmers weiter in Richtung zur Wand bewegt. Bei einem schnellkräftig ausgeführten Beugen in der Hüfte kann die Geschwindigkeit der Beine in Richtung auf die Wand sogar höher als v_{KSP} sein. Demzufolge ist Δv_{KSP} deutlich geringer und es bleibt im Vergleich zu Variante 1 ein größerer Impuls bei der Drehung erhalten.

2.3.2 Drehimpuls und Drehmoment

Für die Beschreibung von Rotationsbewegungen werden Drehimpuls und Trägheitsmoment verwendet. Der **Drehimpuls** D_i eines Körpers bei einer Drehung um eine Achse i ist das Produkt aus dem Trägheitsmoment des Körpers J_i bezüglich der Achse i und der Drehgeschwindigkeit ω_i um die Achse i :

$$D_i = J_i * \omega_i \quad . \quad (6)$$

Das **Drehmoment** M_i auf einen Körper bezüglich der Achse i ist der Quotient aus der Änderung des Drehimpulses ΔD_i und des Zeitintervalls Δt , für den die Änderung des Drehimpulses bestimmt wird:

$$M_i = \frac{\Delta D_i}{\Delta t} \quad . \quad (7)$$

Die Gleichungen für die Rotation (6) und (7) haben eine analoge Struktur wie die Gleichungen für die Translation (3) und (4). Jedoch anders als die Masse bei Translationsbewegungen ist das Trägheitsmoment bei vielen sportlichen Bewegungen keine konstante Größe. Das Trägheitsmoment hängt von der Massenverteilung in Bezug auf die Drehachse ab und dessen Wert kann durch Teilkörperbewegungen stark verändert werden: $J_i \propto r^2$, wobei r der Abstand der betrachteten Masse zur Rotationsachse ist.

Die Veränderung des Trägheitsmomentes spielt in verschiedenen Sportarten bei Rotationsbewegungen (Eiskunstlauf, Turnen, Wasserspringen, Kugelstoßen, Diskuswerfen) eine zentrale Rolle, sollte aber auch im Schwimmen bei der Drehung im Wendeabschnitt berücksichtigt werden.

Kippwende

Bei der Kippwende kann während des Handkontakts eine Kraft F_H für das Erzeugen eines Drehmoments und als Ergebnis dessen eines Drehimpulses genutzt werden. Die im Stütz gegen die Wand wirksam gemachte Kraft F_H und eine hohe Körperspannung im Rumpf sind für das Erzeugen eines „rückwärtsdrehenden“ Moments notwendig, wobei sich der Oberkörper oberhalb des KSP von der Wand weg und der Unterkörper unterhalb des KSP auf die Wand zu bewegen. Durch das Wirken dieses Drehmoments ändert sich der Drehimpuls entsprechend Gleichung (7):

$$D_i = D_{0i} + \Delta D_i = M_i * \Delta t \quad . \quad (8)$$

Da für den Drehimpuls am Beginn des Handkontakts $D_{0i} = 0$ gilt, kann aus den Gleichungen (6) und (8) die folgende Formel für die Drehgeschwindigkeit ω_i abgeleitet werden:

$$\omega_i = \frac{M_i}{J_i} * \Delta t \quad . \quad (9)$$

Eine hohe Drehgeschwindigkeit ist die Voraussetzung für das Erzielen einer kurzen Drehzeit Δt_d . Dafür müssen entsprechend Gleichung (9) im Bewegungsablauf der Kippwende zwei Sachverhalte realisiert werden:

1. Erzeugen eines großen Drehmoments (für eine kurze Zeit Δt) durch ein schnellkräftiges Hocken der Knie zum Rumpf am Beginn der Drehung (Abb. 5).
2. Realisieren eines kleinen Trägheitsmoments durch das schnelle Einnehmen einer engen Körperhaltung (Abb. 6).



Abb. 5. Generieren eines Drehmoments bei der Kippwende

Mit einem schnellkräftigen Beugen in Hüfte und Knie werden die Beinmassen in Richtung Wand weiterbewegt und ein Teil des Impulses aus der Translation in die Rotation übertragen. Durch das schnelle Einnehmen einer kompakten Körperposition wird frühzeitig ein kleineres Trägheitsmoment realisiert, was zur Erhöhung der Drehgeschwindigkeit und damit zur Verkürzung der Drehzeit beiträgt. Ein Halbieren des Trägheitsmoments hat eine Verdopplung der Drehgeschwindigkeit zur Folge, was die Drehzeit um einige Zehntelsekunden verringert.

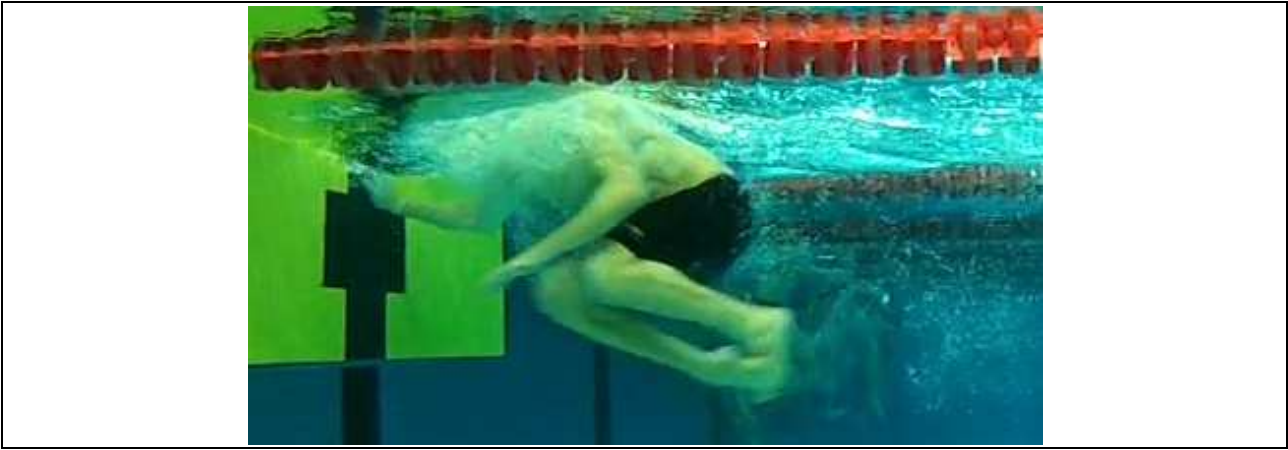


Abb. 6. Realisieren eines kleinen Trägheitsmoments bei der Kippwende

Die Drehzeit kann bei der Kippwende in einem relativ großen Bereich variieren. So wurden in den Brust- und Schmetterlingsdisziplinen für Finalteilnehmer bei internationalen Meisterschaften Werte im Bereich von 0,7 bis 1,2 s bestimmt. Kurze Drehzeiten ($< 0,8$ s) sind für Variante 2 mit kurzem Handkontakt ($< 0,4$ s) charakteristisch. Lange Drehzeiten (> 1 s) für Variante 1 sind mit langem Handkontakt ($> 0,6$ s) verbunden.

Rollwende

In den Freistildisziplinen dominiert das Kraulschwimmen, wobei eine Rollwende zur Richtungsumkehr ausgeführt wird. Die Drehung wird etwa einen Meter vor der Wand begonnen. Das für eine schnelle Drehung notwendige Drehmoment wird durch die Wasserwiderstandskraft F_W erzeugt, die durch ein Anstellen der Rückenfläche (gegen die Schwimmrichtung) wirksam wird (Abb. 7).

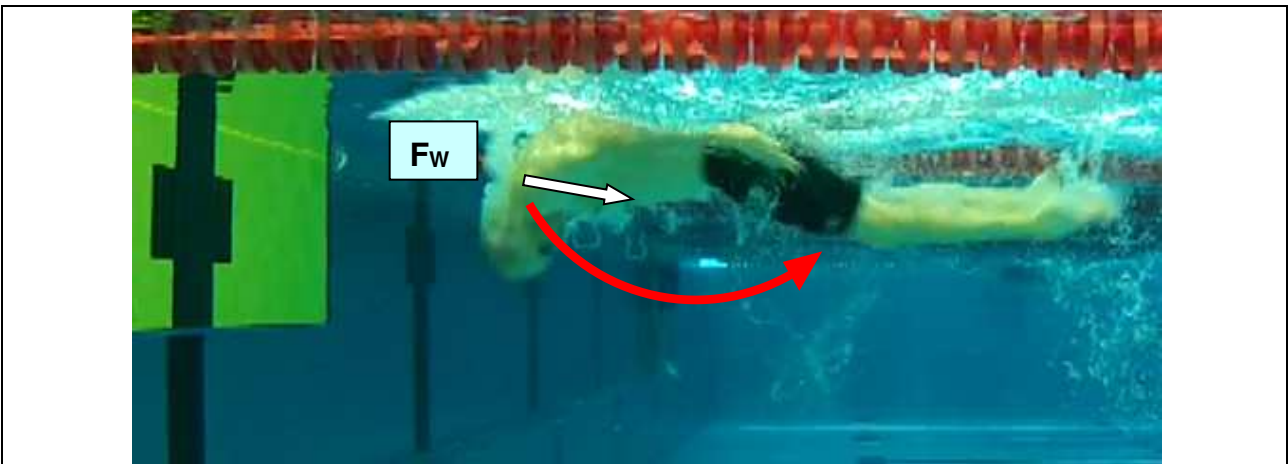


Abb. 7. Generieren eines Drehmoments bei der Rollwende

Für das Krümmen des Oberkörpers und das Schließen des Hüftwinkels ist es zweckmäßig, einen Delfinkick auszuführen, weil damit ein „äußeres“ Widerlager (an den Beinen/Füßen wirksamer Wasserwiderstand) genutzt werden kann, das die für das Erzeugen des Drehmoments notwendigen Teilkörperbewegungen (Krümmen des Oberkörpers, Beugen des Hüftwinkels) unterstützt. Analog zum Bewegungsablauf bei der Kippwende muss

nachfolgend schnell eine kompakte Körperposition (zur Verkleinerung des Trägheitsmoments) eingenommen werden.

In den Freistildisziplinen wurden bei internationalen Wettkämpfen für Rollwenden von Weltklasseathleten Drehzeiten von 0,6 bis 1,0 s bestimmt. Werte $< 0,7$ s erreichen Männer in Sprintwettbewerben über 50 m auf der 25-m-Bahn. Zeiten $> 0,9$ s wurden für Frauen in Rennen über 1.500 m beobachtet.

2.4 Abstoß

Mit dem Abstoß von der Beckenwand besteht die Möglichkeit, einen deutlich höheren Wert der Geschwindigkeit v_{KSP} als beim Anschwimmen zur Wand zu erreichen. Am Ende des Abstoßes (beim Lösen der Füße von der Beckenwand) werden von den besten Schwimmerinnen und Schwimmern Geschwindigkeiten realisiert, die mehr als doppelt so groß als beim Schwimmen in der zyklischen Bewegung sind. Dafür müssen die zur Beschleunigung möglichen Antriebsbewegungen entsprechend der individuellen Leistungsvoraussetzungen koordiniert werden. Im Folgenden soll auf einige physikalische Aspekte hingewiesen werden, die dabei zu berücksichtigen sind.

2.4.1 Antrieb und Widerstand

Die Bewegung des KSP wird durch die resultierende Kraft F_R , die sich aus der Wechselwirkung mit der Umgebung ergibt, bestimmt. In vereinfachender Darstellung kann diese Wechselwirkung durch zwei Kräfte beschrieben werden (Abb. 8):

1. die im Stütz an der Wand wirksam gemachte Abstoßkraft F_{abst} ,
2. die resultierende Wasserwiderstandskraft F_W (Gesamtheit der Wechselwirkung mit dem umgebenden Wasser).

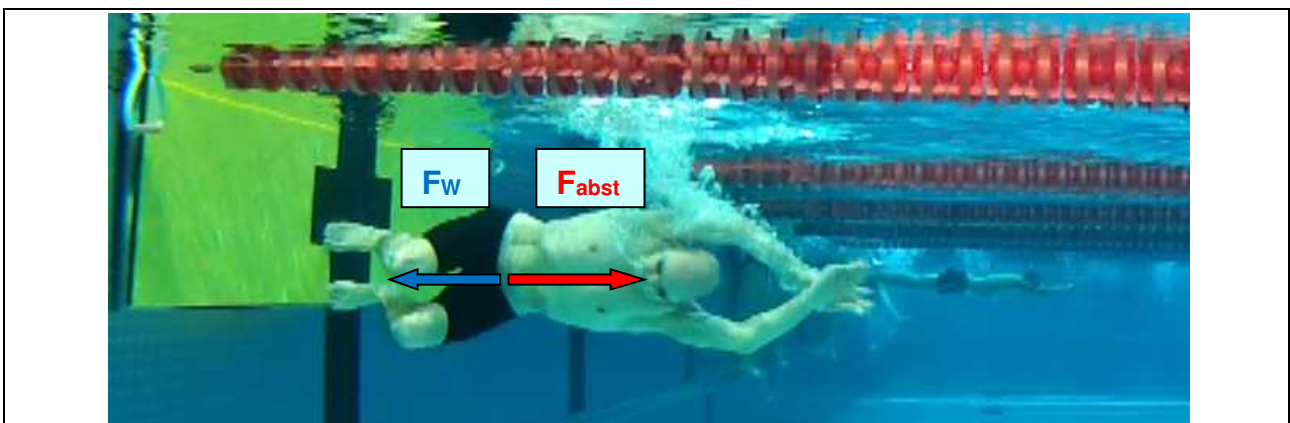


Abb. 8. Beim Abstoß wirkende äußere Kräfte

Im Allgemeinen Fall wirken die drei Kräfte in allen drei Raumrichtungen (sind vektorielle Größen) und durch folgende Beziehung miteinander verknüpft:

$$F_R = F_{abst} + F_W \quad (10)$$

Abstoßkraft und Wasserwiderstand wirken auf den KSP in unterschiedlicher Weise. Die Abstoßkraft hat eine beschleunigende Wirkung und die Wasserwiderstandskraft arbeitet dem entgegen. In analoger Weise zur Situation am Beginn der Drehung (vgl. Kapitel 2.3.1) ist der zeitliche Mittelwert der resultierenden Kraft während des Abstoßes der Quotienten aus der Änderung des Impulses ΔI_{abst} und der Dauer des Abstoßes Δt_{abst}

$$F_R = \frac{\Delta I_{abst}}{\Delta t_{abst}} = \frac{m * \Delta v_{KSP}}{\Delta t_{abst}} \quad (11)$$

Aus den Gleichungen (10) und (11) werden die Änderungen der KSP-Geschwindigkeit berechnet

$$\Delta v_{KSP} = (F_{abst} + F_W) * \frac{\Delta t_{abst}}{m} \quad (12)$$

Die Geschwindigkeit, die am Ende des Abstoßes erzielt wird, ist durch das Verhältnis der an der Beckenwand realisierten Abstoßkraft zu dem während des Abstoßes wirkenden Wasserwiderstands bestimmt. Aus Gleichung (12) kann als Fazit geschlussfolgert werden: Abstoßkraft maximieren und Wasserwiderstand vermeiden. Das Erzielen einer im Mittel hohen Abstoßkraft ist davon abhängig, wie die beim Abstoß wirksamen muskulären Antriebe (bei der Streckung von Rumpf, Knie- und Fußgelenk) für eine Beschleunigung eingesetzt werden.

2.4.2 Arbeit und Leistung

Bei der Rollwende bewegt sich der Schwimmer am Ende der Drehung nur noch mit geringer Geschwindigkeit v_0 auf die Wand zu, weil der wesentliche Anteil der Bewegungsenergie in der Wechselwirkung mit dem Wasser an das Wasser abgegeben wurde. Infolgedessen müssen die muskulären Antriebe mit Beginn des Abstoßes nur noch wenig Arbeit zum Abbremsen der Bewegung (in Richtung zur Wand) A_0 leisten. Der Hauptteil wird für das Beschleunigen des KSP A_B und zur Überwindung des Wasserwiderstands A_W benötigt. Die Anteile der Brems- bzw. Beschleunigungsarbeit können aus der Änderung der kinetischen Energie berechnet werden:

$$A_0 = \frac{m}{2} * v_0^2 \quad (13)$$

$$A_B = \frac{m}{2} * v_{abst}^2 \quad (14)$$

Dabei ist v_{abst} die Geschwindigkeit des KSP im Moment des Lösens der Füße. Die Arbeit gegen den Wasserwiderstand erhält man als Produkt von Wasserwiderstandskraft F_W und dem zurückgelegten Weg des KSP Δs_{KSP} (Abb. 9):

$$A_W = F_w * \Delta s_{KSP} \quad (15)$$

Die Gesamtarbeit beim Abstoß A_{abst} ist die Summe der Teilarbeiten aus den Gleichungen (13), (14) und (15):

$$A_{abst} = \frac{m}{2} * (v_0^2 + v_{abst}^2) + F_w * \Delta s_{KSP} \quad (16)$$

Für $v_0 < 0,5$ m/s beträgt der Anteil der Bremsarbeit weniger als 3 % der Gesamtarbeit. Nur etwa zwei- bis dreimal größer ist der Beitrag der Arbeit gegen den Wasserwiderstand. Der

Hauptteil der Abstoßarbeit wird als Beschleunigungsarbeit verrichtet. Bei $v_{abst} > 3 \text{ m/s}$ sind das mehr als 90 %.

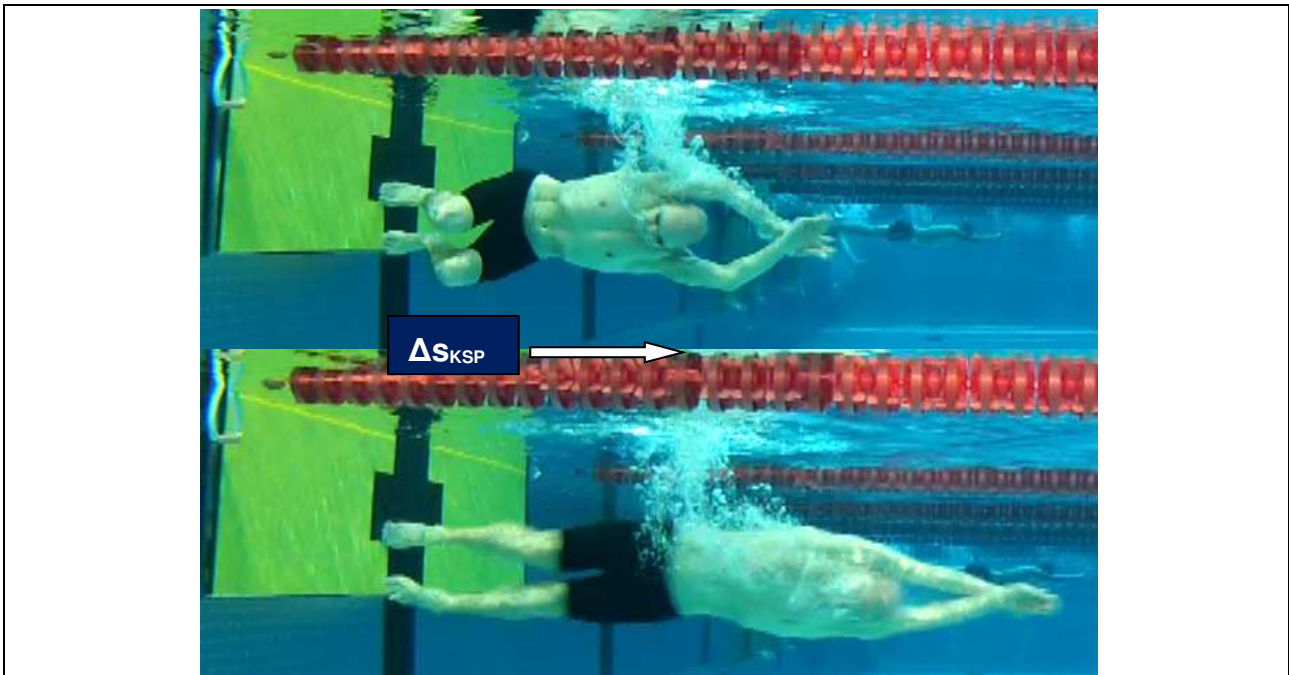


Abb. 9. Weg des KSP beim Abstoß

Der zeitliche Mittelwert der beim Abstoß wirksam gemachten mechanischen Leistung P_{abst} kann aus dem Quotienten der Abstoßarbeit A_{abst} und der Dauer des Abstoßes Δt_{abst} abgeschätzt werden:

$$P_{abst} = \frac{A_{abst}}{\Delta t_{abst}} = \frac{m}{2 \cdot \Delta t_{abst}} * (v_0^2 + v_{abst}^2) + F_w * \frac{\Delta s_{KSP}}{\Delta t_{abst}} \quad (17)$$

Für einen Schwimmer mit einer Masse von 85 kg, der mit einer Abstoßdauer von 0,25 s eine Abstoßgeschwindigkeit von 3,5 m/s erreicht, beträgt P_{abst} annähernd 2 kW.

In Bezug auf eine zweckmäßige Ausführung des Abstoßes können zusammenfassend folgende Kriterien (für alle Wendevarianten) genannt werden:

- Setzen der Füße in kompakter Körperposition,
- Entwicklung einer hohen Anfangskraft am Beginn des Abstoßes (im Knie- und Fußgelenk) durch ein Öffnen des Hüftwinkels (Rumpf wird in Abstoßrichtung positioniert),
- Nachfolgende schnellkräftige Streckung im Kniegelenk (Spannung im Fußgelenk erhöhen),
- Gleichschalten der Streckung in Fuß-, Kniegelenk bzw. des Rumpfs und Minimieren des Wasserwiderstands in der Endphase des Abstoßes.

2.5 Übergang

Analog zum Abstoß ist die Bewegung eines Schwimmers im Übergang durch die Größe der resultierenden, am KSP angreifenden Kraft F_{Res} bestimmt. Sie ist das Ergebnis aus der Summe aller antreibenden Kräfte (Antrieb F_{Antr}) und der die Bewegung bremsenden Kräfte (Widerstand F_{Br}):

$$F_{Res} = F_{Antr} + F_{Br} \quad (18)$$

Aktuell kann die Wechselwirkung des Schwimmers mit dem Wasser nur in kleinen Details gemessen werden. Jedoch gibt es einige experimentelle Fakten, die „für ein gezieltes Versuch und Irrtum“ bei der Suche nach einer individuell optimalen Gestaltung des Übergangs berücksichtigt werden sollten.

In den Übergängen der verschiedenen Wendevarianten können in Bezug auf die Antriebssituation im Wesentlichen drei Fälle unterschieden werden:

1. Gleiten
2. Tauchzug/Delfinkick
3. Delfinbewegung.

2.5.1 Wasserwiderstand und Tauchtiefe

Aus experimentellen Untersuchungen ist bekannt, dass der Wasserwiderstand eines geschleppten Körpers mit zunehmender Tauchtiefe abnimmt (Pendergast, Di Prampero, Craig, Wilson & Rennie, 1977; Wick, 2005). In Abbildung 10 ist eine qualitative Darstellung zu diesem Sachverhalt wiedergegeben.

An der Wasseroberfläche wirken drei Komponenten des Wasserwiderstands: Reibungs-, Form- und Wellenwiderstand. Mit zunehmender Wassertiefe verringert sich der Wellenwiderstand, weil der steigende Wasserdruck (durch die darrüberliegende Wasserschicht) der Ausbreitung von Impuls und Energie, die vom bewegten Körper an das Wasser abgegeben werden, entgegenwirkt. Impuls und Energie, die an der Vorderfront des Körpers an das Wasser abgegeben werden, verbleiben in einer schmalen Schicht des den Körper umströmenden Wassers und werden am Ende des Körpers zum Teil an den Körper zurückübertragen. Bewegt sich der Schwimmer zu nah an der Wasseroberfläche entstehen durch den Transfer von Impuls und Energie Wellen, die sich vom Schwimmer wegbewegen. Je größer diese Welle umso höher der Transfer von Energie bzw. Impuls vom Körper an das Wasser.

Die Abhängigkeit des Wasserwiderstands vom Abstand zur Wasseroberfläche sollte bei der Gestaltung der Übergänge vor allem in den Gleitphasen beim Brustschwimmen aber auch bei der Delfinbewegung im Rücken-, Schmetterlings- und Kraulschwimmen berücksichtigt werden.

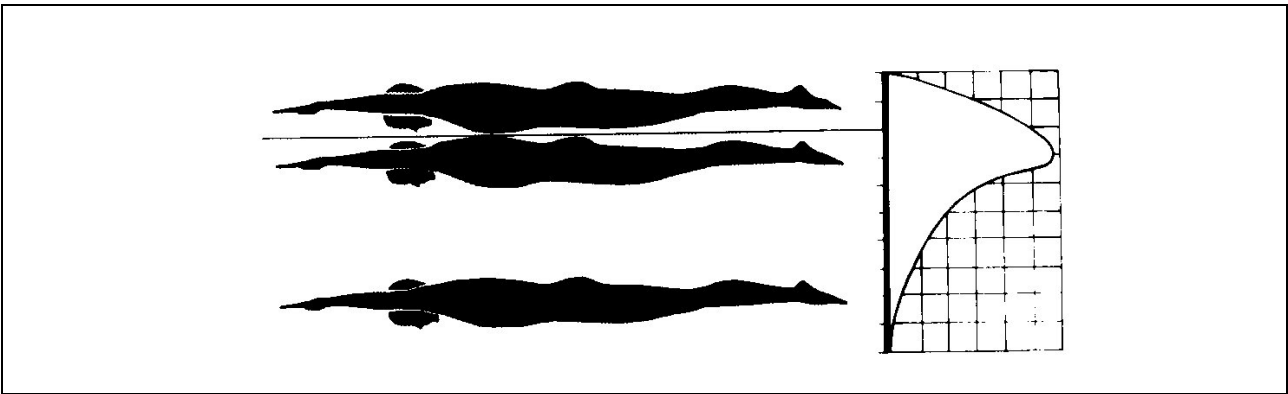


Abb. 10. Änderung des Wasserwiderstands in Abhängigkeit von der Tauchtiefe

Zur zweckmäßigen Tauchtiefe finden sich in neuerer Literatur verschiedene Angaben (Wick, 2005; Ungerechts, Volck & Freitag, 2002). Als Erklärung für diese Unterschiede kann darauf verwiesen werden, dass die Körperform einen wesentlichen Einfluss auf die Größe des Widerstands hat. Der Praktiker kann sich am Wellenbild in der Umgebung des Schwimmers orientieren: keine Welle an der Wasseroberfläche sind ein Hinweis für eine ausreichende Tauchtiefe.

2.5.2 Gleiten

Mehr oder weniger lange Gleitphasen werden von vielen Schwimmerinnen und Schwimmern nach dem Abstoß und bei Brust- bzw. Lagenübergangswende (Rücken/Brust) nach Tauchzug/Delfinkick ausgeführt. In den Gleitphasen kann von einer stabilen Körperform und $F_{Antr} = 0$ ausgegangen werden, sodass

$$F_{Res} = F_{Br} \quad (19)$$

mit

$$F_{Br} = -c_{eff} * v^2 \quad (20)$$

Gleichung 20 ist eine Variante für den Wasserwiderstand, die in der Praxis angewendet wird, wobei der effektive Widerstandsbeiwert c_{eff} im Experiment (Schleppversuche bei verschiedenen Körperhaltungen und Geschwindigkeiten) bestimmt wird (Onoprienko, 1967). Berücksichtigt man Gleichung 20 in der Newtonschen Bewegungsgleichung, so erhält man für die Gleitphase den Verlauf der Geschwindigkeit v_G bzw. den zurückgelegten Weg s_G

$$v_G = v_0 * \frac{m}{m + c_{eff} * v_0 * (t - t_0)} \quad (21)$$

$$s_G = \frac{m}{c_{eff}} \ln \left[1 + \frac{c_{eff}}{m} v_0 * (t - t_0) \right] \quad (22)$$

Darin sind m die Masse des Schwimmers, t_0 der Zeitpunkt des Beginns der Gleitphase und v_0 die Geschwindigkeit des KSP am Beginn der Gleitphase.

Die Gleitphase wird beendet, wenn die Geschwindigkeit auf die angestrebte Schwimmgeschwindigkeit v_a abgebremst ist. Dann gilt für Zeitdauer der Gleitphase:

$$t_G = \frac{m}{c_{eff}} \left(\frac{1}{v_a} - \frac{1}{v_0} \right) \quad (23)$$

Die Dauer der Gleitphase ist abhängig von der Masse des Schwimmers, dem Wasserwiderstandsbeiwert, der Geschwindigkeit am Beginn des Gleitens und der am Ende der Gleitphase angestrebten Geschwindigkeit.

2.5.3 Delfinbewegung

Die Delfinbewegung (in ausreichender Tiefe) ist eine geeignete Antriebsmöglichkeit, wenn es darum geht, nach dem Abstoß von der Beckenwand den Abfall der Geschwindigkeit hinauszuzögern. Sie wird in Abhängigkeit von individuellen Leistungsvoraussetzungen und Anforderungen in der jeweiligen Disziplin im Rücken-, Schmetterlings- und Freistilschwimmen aber auch in den Lagenübergängen (Schmetterling/Rücken, Brust/Freistil) praktiziert.

Auf der Grundlage entsprechender Krafftfähigkeiten werden am Ende des Abstoßes Geschwindigkeiten erzielt, die etwa doppelt so hoch sind wie die Geschwindigkeiten, die im Rücken-, Schmetterlings- oder Kraulschwimmen ohne Hilfsmittel erreichbar sind. Mit der Delfinbewegung ist dieses hohe Niveau zwar nicht zu halten, aber der Abfall der Geschwindigkeit kann wirksamer verzögert werden, als es in der Schwimmart an der Wasseroberfläche möglich ist. Grund dafür ist die Tatsache, dass der Wasserwiderstand bei der Delfinbewegung unter Wasser deutlich niedriger als bei einer Bewegung an der Wasseroberfläche ist (Abschnitt 2.4.1), sodass mit den Antriebsimpulsen der Delfinbewegung in der Tiefe ein höherer Vortrieb als mit den Antriebsbewegungen in der Schwimmart an der Wasseroberfläche erzielt wird.

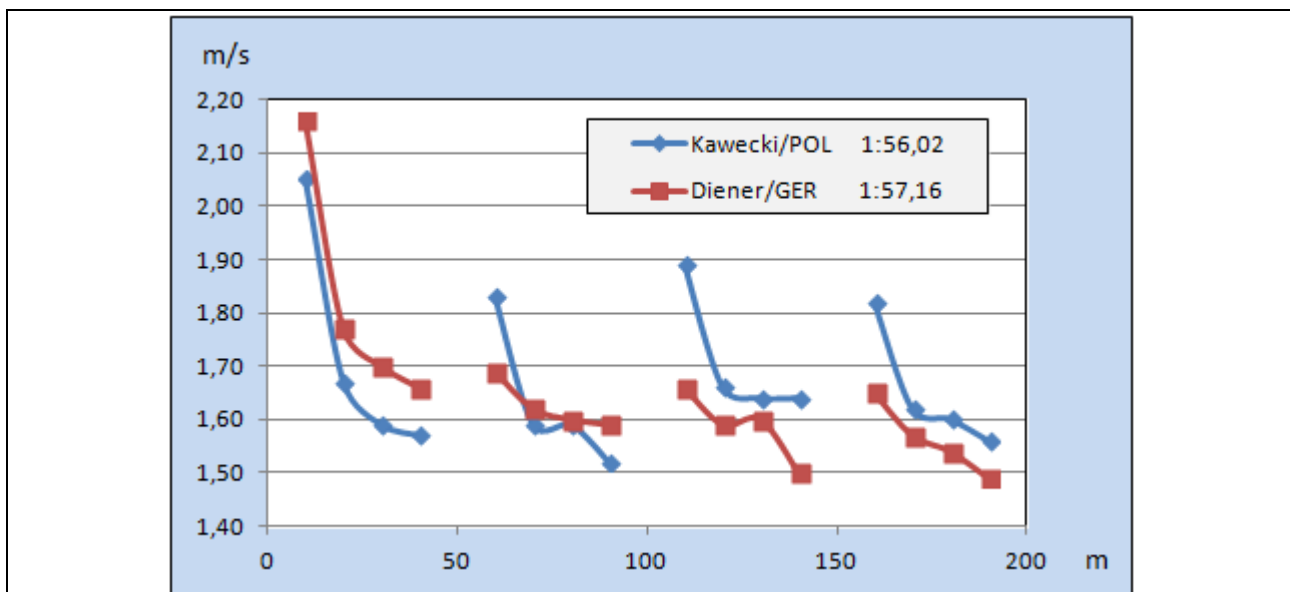


Abb. 11. Verlauf der Geschwindigkeit über 200 m Rücken der Männer (EM-Finale 2014)

Der Vorteil einer antriebsstarken Delfinbewegung wird in der Verbindung mit einer hohen Geschwindigkeit am Ende des Abstoßes zu einer wettkampftscheidenden Größe, weil der Vorteil einer höheren Geschwindigkeit im Übergang nicht mehr durch eine Geschwindigkeit in der zyklischen Bewegung der Schwimmarbeit kompensiert werden kann. Besonders deutlich zeigt sich dieser Effekt im Rückenschwimmen (Abb. 11), wo die besten „Delfine“ in den Übergängen bei der Wende im Mittel um 0,2 bis 0,3 m/s höhere Geschwindigkeiten als im Rückenschwimmen erreichen.

Der Vergleich in Abbildung 11 macht aber auch deutlich, dass der Vorteil einer antriebsstarken Delfinbewegung nur wirksam wird, wenn er entsprechend der Gesamtanforderungen im Wettkampf auf einem notwendig hohen Niveau konditioniert wurde.

2.5.4 Antriebsvarianten bei der Brustwende

Die Wettkampffregeln erlauben im Brustschwimmen beim Übergang als Antriebsaktion einen Delfinkick und einen Tauchzug. Die Kombination von Tauchzug und Delfinkick trägt bei der Brustwende bzw. beim Lagenübergang von Rücken nach Brust entscheidend dazu bei, dass im Übergang höhere Geschwindigkeiten als in der zyklischen Bewegung des Brustschwimmens erreicht werden. In Bezug auf die Koordination beider Antriebsbewegungen können zwei Varianten beobachtet werden:

– Variante 1:

Delfinkick und Tauchzug werden nacheinander ausgeführt. Während des Delfinkicks bleiben die Hände/Arme in strömungsgünstiger Position. Gleichzeitig bieten die gestreckten Arme ein gutes Widerlager für die Vorbereitung und Ausführung eines kraftvollen Delfinkicks. Nach Beenden des Delfinkicks wird der Armzug ausgeführt. Dabei befinden sich Körper/Beine in strömungsgünstiger Position. Bei dieser Variante werden die vortriebswirksamen Antriebsaktionen nacheinander ausgeführt, wobei sich der jeweils passive Körperteil in einer strömungsgünstigen Position befindet.

– Variante 2:

Es wird mit dem Armzug begonnen und Körper/Beine verbleiben in strömungsgünstiger Position. Der Delfinkick wird in der Druckphase des Tauchzugs ausgeführt. In der Mitte des Armzugs werden die Füße aufwärts bewegt. Damit wird die strömungsgünstige Position verlassen, was einerseits den Anteil des „bremsenden“ Widerstands erhöht und damit andererseits dazu beiträgt, dass im Armzug höhere, antreibende Kräfte in der Wechselwirkung mit dem Wasser generiert werden können. Am Ende wird durch das Gleichschalten von Abwärtskick und Abdruck eine hohe Vortriebswirkung erzielt.

Variante 2 ist eine für das Schmetterlingsschwimmen typische Koordination von Arm- und Beinbewegung. Deshalb ist naheliegend, dass bei Variante 2 ein international erfolgreicher Schmetterlingsschwimmer in Sprintrennen über 50 m Brust (25-m-Bahn) die höchsten Ge-

schwindigkeiten erzielt. Er hat im Abschnitt von 30 bis 40 m gegenüber dem schnellsten Schwimmer mit Variante 1 einen Vorteil von etwa zwei Zehntelsekunden erzielt.

3 Zur Optimierung des Bewegungsablaufs

Eine Optimierung des Bewegungsablaufs muss aus der Gesamtsicht in Bezug auf die Anforderungen der Disziplin und auf die Leistungsvoraussetzungen des einzelnen Athleten erfolgen. Daraus ergeben sich im konkreten Einzelfall Unterschiede bezüglich der Antworten auf die Frage „Was ist zweckmäßig?“. Bei der Beantwortung dieser Frage kann die Gleichung (1) eine Hilfe sein, weil sie eine quantitative Bestimmung einzelner Einflussfaktoren auf die Leistung im Wendeausschnitt und damit auf die Gesamtleistung im Wettkampf möglich macht.

4 Literatur

- Chow, J., Hay, J., Wilson, B., Imel, C. (1984). Turning techniques of elite swimmers. *Journal of Sports Sciences* 2, 241-255.
- Counsilman, J. E. (1980). *Handbuch des Sportschwimmens*. Bockenem: Fahnenmann.
- Guimaraes, A.C.S. & Hay, J.G. (1985). A Mechanical Analysis of the Grab Starting Technique in Swimming. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1985 (1), 25-35.
- Küchler, J. (1998). Zur Optimierung des Bewegungsablaufes bei Start und Wende im Sportswimmen. In W. Freitag (Hrsg.), *Schwimmen lernen und optimieren*, Bd. 15 (S. 78-91). Rüsselsheim: Deutsche Schwimmtrainer-Vereinigung e.V..
- Maglischko, E. W. (2003). *Swimming fastest. The essential reference on technique, training and program design*. Champaign: Human kinetics.
- Onoprienko, B. I. (1967). Vlijanie antropometricheskich dannych na gidrodinamiku plovca. *Teor. il Prakt. Fiz. Kul't. Moskva*, 4, 47-52.
- Pendergast, D. R., Di Prampero, P. E., Craig, J. R., Wilson, D. R. & Rennie, D. W. (1977). Quantitative analysis of the front crawl in men and women. *J Appl Physiol* 43 (3), 475-479.
- Pendergast, D. R., Tedesco, M., Nawrocki, D. M. & Fisher, N.M. (1996). Energetics of underwater swimming with SCUBA. *Medicine and science in sport and exercise* 28 (5), 573-580.
- Pfeifer, H. (1991). *Schwimmen*. Berlin: Sportverlag.
- Schramm, E. (1987). *Sportschwimmen: Hochschullehrbuch*. Berlin: Sportverlag.
- Ungerechts, B., Volck, G. & Freitag, W. (2002). Schorndorf: Hofmann.
- Wick, D. (2005). *Biomechanische Grundlagen sportlicher Bewegungen*. Balingen: Spitta Verlag.
- Wilke, K. & Daniel, K. (2000). *Schwimmen: Lernen, Üben, Trainieren* (3. korr. und ergänzte Aufl.). Wiebelsheim: Limpert.