
Simulative Untersuchungen zum Startsprung im Sportschwimmen

Albrecht Keil¹, Thomas Härtel¹, Axel Schleichardt², Jürgen Kuchler²
& Jens Graumnitz²

¹ Institut für Mechatronik e.V. Chemnitz

² Institut für Angewandte Trainingswissenschaft Leipzig

Problemstellung

Die Leistungsentwicklung im Sportschwimmen verlief seit den Olympischen Spielen 1996 in Atlanta kontinuierlich. Auch aufgrund der rasant verlaufenden technologischen Entwicklung der Wettkampfbekleidung kam es seit 2007 zu deutlich größeren Entwicklungsraten als zuvor. Zugleich nimmt die Leistungsdichte in der Weltspitze weiter zu, wie das Ergebnis des 50-m-Freistil-Wettbewerbs der Frauen von Olympia 2008 in Peking zeigt. Die Zweitplatzierte trennte eine Fingerbreite von der Goldmedaille, die Fünfte schlug keine zwei Kopflängen nach der Siegerin an. Eine wesentliche Rolle bei der Leistungssteigerung spielten insbesondere Verbesserungen der Techniken bei Starts und Wenden (Kuchler, 2001). In diesem Zusammenhang gilt das Interesse auch dem Startbereich, besonders dann, wenn man berücksichtigt, dass dieser auf den 100-m-Strecken 10 % bis 15 % der Wettkampfdistanz bzw. ca. 12 % der Wettkampfzeit ausmacht.

Für die Antriebsleistungen beim Startsprung sind die ersten drei Phasen des Starts (Ausgangsstellung, Auftakt, Absprung) entscheidend. Bis zum Ende der dritten Phase, wenn die Füße den Block verlassen, vergehen bei den Weltbesten sechs bis acht Zehntelsekunden, in denen eine möglichst hohe Geschwindigkeit (horizontale Komponente) erreicht werden muss. Im Gegensatz zu den meisten anderen Sportarten ist die Geschwindigkeit im Schwimmen kurz nach Beginn des Rennens am höchsten. In dem Moment, da die Füße den Startblock verlassen, beträgt sie das zwei- bis dreifache der Geschwindigkeit, die bei Maximalsprints mit der zyklischen Bewegung erreicht wird. Deshalb kommt der Ausführung der Absprungbewegung vom Block immer größere Bedeutung zu (Kuchler & Graumnitz, 2006). Die aktuell praktizierten Starttechniken unterscheiden sich durch unterschiedliche Ausgangspositionen auf dem Startblock. Während sich der Greifstart durch eine parallele Fußstellung auszeichnet, befinden sich die Füße beim Schrittstart in einer Schrittstellung. Dabei kann das Körpergewicht mehr auf den vorderen Fuß oder mehr auf den zurück gestellten Fuß verlagert werden.



Abb. 1. Ausgangspositionen der gebräuchlichsten Startvarianten vom Block bei Einzelrennen

Modellierung und Simulation

Erweiterungen des biomechanischen Menschmodells

Das biomechanische Menschmodell Dynamicus, das als zusätzliche Bibliothek zu dem allgemeinen MKS-Tool *alaska* verfügbar ist, unterstützt die Bearbeitung beliebiger Anwendungen auf dem Gebiet menschlicher Bewegungen bzw. von Mensch-Technik-Problemen. Ein effizienter Einsatz dieses Werkzeugs zur Beantwortung trainingswissenschaftlicher Fragestellungen erfordert stets eine weitere Spezialisierung des Werkzeugs im Hinblick auf die zu untersuchende Übung. Zur Anpassung des Menschmodells an die Simulation von Startsprüngen wurde ein Standardmodell entwickelt, das alle notwendigen Funktionalitäten umfasst. Dieses Modell enthält z. B. bereits vorkonfiguriert die verschiedenen Markersätze für die 2D- oder 3D-Bewegungserfassung je nach Startvariante Greif- oder Schrittstart. Damit kann allein durch die Auswahl einer Startvariante eine Konfiguration des Modells erzeugt werden, die ein effizientes Arbeiten ohne detaillierte Kenntnisse des Modells ermöglicht. Die Bedienung des Modells wurde so weit vereinfacht, dass alle wesentlichen Eingabegrößen in anwendungsspezifischen Dialogen definiert werden können.

Zur Verbesserung der Modelle wurden verschiedene Komponenten weiterentwickelt und für die Aufgabenstellung angepasst (Härtel & Hermsdorf, 2009)). Für die anthropometrische Beschreibung des Probanden wurde eine Vermessungsvorschrift erarbeitet, bei der Höhen, Breiten und Umfänge am Probanden abgenommen und aus Regressionsformeln die Längen sowie durch Volumenintegration die Masse und Trägheitseigenschaften der Körperteile berechnet werden. Alternativ ist es möglich, anthropometrische Leitmaße (z. B. Knie- und Schulterhöhe, Armlänge) direkt als Parameter zu definieren. In einem neuen Wirbelsäulenmodell wird diese durch 17 Wirbelsäulenkörper und 7 Halswirbelkörper modelliert. Die kinematische Koppelung erfolgt durch Kugelgelenke an der jeweiligen Endplatte des Wirbelkörpers. Die Biegelinie der Wirbelsäule wird durch eine parametrisierte Ansatzfunktion beschrieben, wobei eine Vorgabe der Position nur weniger Punkte zur Beschreibung der Krümmung ausreichend ist. Damit kann das Bewegungsverhalten des Probanden wesentlich genauer abgebildet werden. Gleichzeitig hat sich die Handhabung des Modells vereinfacht, ohne dass sich die zur Berechnung der inversen Kinematik notwendige Rechenzeit wesentlich vergrößert hat.

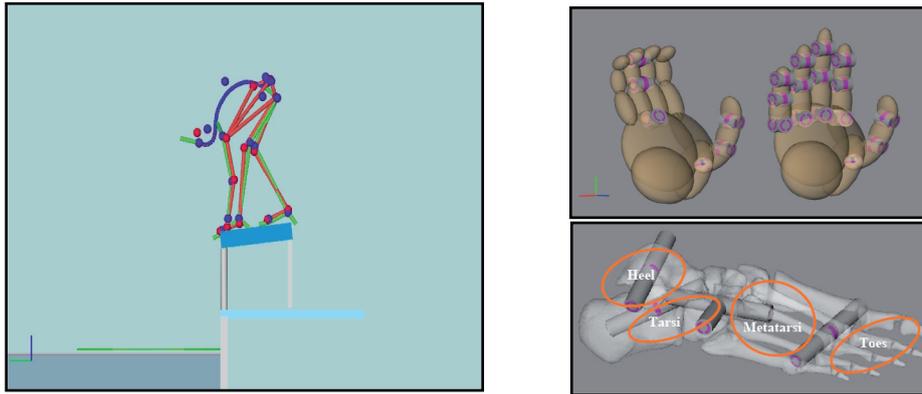


Abb. 2. Segmentmodelle für Wirbelsäule, Fuß und Hand

Für den menschlichen Fuß wurde ein 4-segmentiges Modell entwickelt, das die Kinematik durch oberes und unteres Sprunggelenk, das Chopart-/Lisfranc-Gelenk, und das Zehengrundgelenk abbildet. Die Anthropometrie wird in Abhängigkeit von der Fußlänge für alle Segmente separat berechnet. Für die Modellierung der Hand wurden zwei unterschiedliche Modellvarianten entwickelt. Die Greifhand besteht aus der Handfläche, einem 3-segmentigen Daumen und einem Greifer, der die restlichen 4 Finger zusammenfasst. Die 5-Finger-Hand besteht im Vergleich dazu aus den einzelnen Fingern mit je 3 Gliedern, die untereinander durch Drehgelenke und zur Handfläche durch Kardangelenke gekoppelt sind. Zur Berechnung der kinematischen Größen werden Handlänge und -breite verwendet.

Simulationsverfahren und Auswertung

Grundlage der entwickelten Technologie sind digital erfasste Bewegungen real ausgeführter Starts. Diese dienen als Maßstab (z. B. für den Vergleich mit Bestleistungen) und darüber hinaus als Referenzbewegung für bestimmte Veränderungen der Bewegung. Für die Aufzeichnung von Wettkampfstarts bei internationalen Wettkämpfen erfolgte die Datenerfassung mit einem Digital-Video-Camcorder mit 50 Bildern pro Sekunde von schräg vorn/oben. Mit dem am Institut für Angewandte Trainingswissenschaft Leipzig entwickelten Programm „Mess2DDV“ wurden 10 Körperpunkte bei Greifstartern und 13 Körperpunkte bei Schrittstartern ausgewertet. Dies geschah jeweils für die Zeitdauer vom Startsignal bis zur ersten Berührung der Hände mit dem Wasser. Im Trainingsprozess wurde sowohl eine seitliche Aufzeichnung als auch eine 3D-Aufzeichnung mit mehreren Kameras verwendet. Nach einer Kalibrierung des Raumes wurden 19 Markerpunkte auf dem Körper der Athletin bzw. des Athleten ausgewertet. Für eine Analyse der Bewegungsabläufe beim Startsprung wurden insgesamt 20 Varianten verglichen. Dabei wurden 12 Männer mit 8 Schritt- und 4 Greifstarts und 8 Frauen mit jeweils 4 Greif- und Schrittstarts untersucht. Die Aufzeichnungen erfolgten unter Trainings- und Wettkampfbedingungen (Härtel & Schleichardt, 2010).

Ergebnis der Bewegungserfassung sind die zeitlichen Verläufe der Koordinaten vordefinierter Markerpunkte im 3D-Raum. Ausgehend von den Markerkoordinaten wird mit einem Optimierungsverfahren die inverse Kinematik des Modells berechnet, d. h. aus den Markerkoordinaten werden die inneren Koordinaten (Gelenkwinkel) des

Modells und die Absolutposition und -orientierung des Beckens berechnet. Diese Darstellung der Bewegung ist die Voraussetzung für alle weiteren Untersuchungen. Die Ermittlung der Absprungsparameter (translatorische und rotatorische Geschwindigkeit des Beckens) erfolgt durch multikriterielle Optimierung derart, dass in der Flugphase der Gesamtdrehimpuls des Menschmodells unverändert bleibt und eine minimale Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Markerkoordinaten erreicht wird. Für die abschließende Gesamtsimulation erfolgt eine dynamische Steuerung der Gelenkwinkel auf die mit Hilfe der inversen Kinematik berechnete Referenzbewegung. Solange ein Fuß des Athletenmodells auf dem Startblock ist, wird auch die Bewegung des Beckens im Raum dynamisch gesteuert. In der Freiflugphase wird diese Steuerung deaktiviert, es werden nur die inneren Koordinaten des Menschmodells dynamisch gesteuert (Härtel & Schleichardt, 2008).

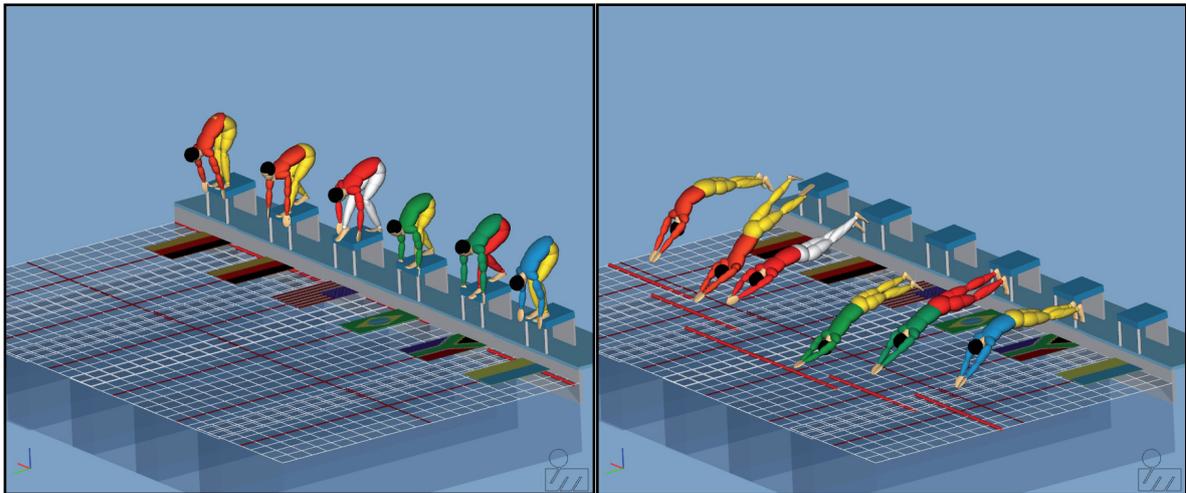


Abb. 3. Vergleich individueller Ausführungsvarianten (z. B. mit internationaler Bestlösung)

Als physikalische Kenngrößen zur Bewertung des Absprunges sind aus Sicht der Trainingswissenschaft die horizontale und vertikale Absprunggeschwindigkeit, der Absprungwinkel (Winkel zwischen der Horizontalebene und dem Geschwindigkeitsvektor des Körperschwerpunkts im Moment des Absprunges), Block- und Flugzeit und die Flugweite relevant. Dabei zeigte sich u. a., dass die größten Flugweiten bei einem Absprungwinkel im Bereich von 0° bis -5° erreicht werden. Diese müssen jedoch stets im Zusammenhang mit den horizontalen Absprunggeschwindigkeiten bewertet werden, die hier zwischen 4 m/s und 5,1 m/s lagen. Die Schwankungsbreite der Flugweite ist bei den Varianten des Schrittstarts deutlich größer als beim Greifstart.

Bewegungsmanipulation

Über die Bewegungsanalyse hinaus werden die aufgezeichneten Bewegungen als Referenzbewegung für eine Bewegungsmanipulation genutzt. Dabei erfolgt die Variation bestimmter Parameter dieser Referenzbewegung, um zu analysieren, welchen Einfluss eine Änderung dieser Parameter auf den komplexen Bewegungsvollzug hat.

Die globale Bewegung der Athletin bzw. des Athleten in der Freiflugphase ist durch den translatorischen Geschwindigkeitsvektor und die Winkelgeschwindigkeit des Beckens zum Absprungzeitpunkt bestimmt. Die (inneren) Gelenkwinkel bleiben gegenüber der Referenzbewegung unverändert. Durch Änderung dieser Absprungparameter (Betrag des Vektors, Skalierung oder Vorgabe der Einzelkomponenten) oder des Absprungwinkels kann eine andere Flugbahn realisiert werden. Weiterhin sind deutliche Unterschiede bei den Armbewegungen der Athletenmodelle zu erkennen. Die Methode zur Variation der Armbewegung ermöglicht es, ab einem gewissen Zeitpunkt (z. B. Absprung) die Armbewegung einer Testperson auf ein beliebig anderes Modell zu übertragen und somit deren Einfluss zu studieren. Zur Manipulation der Bewegung der Bein- und Armbewegungen erfolgt eine Interpolation der Gelenkwinkel der Bein- und Armbewegungen mit einer Splinefunktion an diskreten Stützstellen. Dadurch besteht die Möglichkeit, sowohl Zeit als auch Winkel zu jedem dieser diskreten Punkte manuell zu variieren.

Diskussion

Das entwickelte Werkzeug wurde im Rahmen von Trainingslehrgängen, Untersuchungen zur Leistungsdiagnostik und bei der Analyse mit dem Mess-Startblock genutzt, um individuelle Technikvarianten in der Simulation abzubilden und um Sportlerinnen und Sportler sowie dem Trainerteam Unterschiede im Vergleich zur Weltspitze zu erläutern. Anhand der Unterschiede konnten konkrete Defizite dargestellt und Hinweise zur Verbesserung der Startausführung erarbeitet werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass beide Techniken zu Spitzenleistungen beim Startsprung führen (Graumnitz et al., 2007). Mit dem Schrittstart können kürzere Blockzeiten als mit dem Greifstart erreicht werden. Die Schrittstartvariante mit zurückgelehnter Position scheint zudem höhere horizontale Beschleunigungen zu ermöglichen. Bei beiden Schrittstartvarianten kann der Einsatz des hinteren Beins zum einen genutzt werden, um höhere horizontale Geschwindigkeiten schon auf dem Startblock zu erzielen, und zum anderen, um einen für das widerstandsarme Eintauchen vorteilhaften Drehimpuls zu erzeugen. Trotzdem kann keine allgemeingültige Empfehlung für die eine oder andere Technik ausgesprochen werden, ohne individuelle Voraussetzungen in Betracht zu ziehen. Die Schrittstartvariante stellt jedoch höhere koordinative Ansprüche an die Athletin oder den Athleten, was ebenfalls ausschlaggebend für die individuelle Wahl der einen oder anderen Technik sein kann.

Im Rahmen des Programms der Komplexen Leistungsdiagnostik (KLD) des Deutschen-Schwimm-Verbandes (DSV) werden Startanalysen durchgeführt. Im Ergebnis solch einer Startanalyse wird ein Datenblatt erstellt, auf dem sehr detailliert relevante Startparameter aufgelistet sind. Aus der Videoanalyse und den Simulationsergebnissen wurden für die Sportlerinnen und Sportler weiterhin Hinweise zu einer effektiveren Bewegungsausführung gegeben, die diese zur Erfüllung von Zielvorgaben für den Startbereich befähigen sollen. Zur trainingsmethodischen Umsetzung der Erkenntnisse kann ein Trainingsprogramm genutzt werden, in welchem den Teilbewegungen der ersten drei Phasen des Starts und ihren Kriterien Übungen zugeordnet sind. Dieses Programm wurde bei einer Nachwuchstrainings-

gruppe des Landesstützpunktes Chemnitz mit 16 Schwimmerinnen und Schwimmern (Jg. 1990 - 94; C-, D/C- und D-Kader; durchschnittlicher Wochentrainingsumfang: 18 Stunden) eingesetzt. Durch den Einsatz des Trainingsprogramms zur Sensibilisierung von Teilbewegungen der ersten drei Phasen des Startsprungs und ein anschließendes Messplatztraining konnten in der Trainingsgruppe deutliche Verbesserungen der Blockzeiten sowie Steigerungen der horizontalen Absprunggeschwindigkeit erreicht werden (Graumnitz, 2009, Graumnitz & Kuchler, 2010).

Literatur

- Graumnitz, J. & Kuchler, J. (2004). Entwicklungstendenzen und Leistungsreserven im Schwimmen. *Zeitschrift für angewandte Trainingswissenschaften*, 2 (11), 119-128.
- Graumnitz, J., Kuchler, J. & Drenk, V. (2007) Greifstart oder Schrittstart - Fakten und Tendenzen aus Analysen bei internationalen Meisterschaften im Sportschwimmen. In W. Leopold (Hrsg.), *Schwimmen – Lernen und Optimieren, Band 28* (S. 90-101). Beucha: Deutsche Schwimmtrainer-Vereinigung e. V.
- Graumnitz, J. (2009). Trainingsmethodischer Ansatz zur Erhöhung der Antriebsleistungen beim Startsprung mit dem Ziel, wettkampfrelevante Parameter zu verbessern. *Leipziger sportwissenschaftliche Beiträge*, 50 (1), 162-167.
- Graumnitz, J. (2010). Erhöhung der Antriebsleistungen beim Start vom Block. In Hahn, Kuchler, Oester, Sperling, Strass & Witt (Hrsg.), *Biomechanische Leistungsdiagnostik im Schwimmen; Beiträge zum dvs-Symposium Schwimmen 2009* in Leipzig (S. 25-29). Bonn: Sportverlag Strauß.
- Härtel, T. & Schleichardt, A. (2008). Evaluation of Start Techniques in Sports Swimming by Dynamics Simulation. In M. Estivalet & P. Brisson (Eds.), *The Engineering of Sport*, 7 (1) (pp. 89-96). Paris: Springer-Verlag France.
- Härtel, T. & Hermsdorf, H. (2009). Neue Methoden zur Bewegungsgenerierung und Modellierung mit alaska. In K. Wagner (Hrsg.), *Informations- und Kommunikationstechnologien in der angewandten Trainingswissenschaft 10, Beiträge zur 10. Frühjahrsschule des IAT, Leipzig* (S. 45-55).
- Härtel, T. & Schleichardt, A. (2010). Dynamiksimulation des Startsprungs im Sportschwimmen. In Hahn, Kuchler, Oester, Sperling, Strass & Witt (Hrsg.), *Biomechanische Leistungsdiagnostik im Schwimmen; Beiträge zum dvs-Symposium Schwimmen 2009* in Leipzig (S. 11-18). Bonn: Sportverlag Strauß.
- Kuchler, J. & Graumnitz, J. (2006). Ergebnisse aus einer Wettkampfbeobachtung bei den XI. Weltmeisterschaften im Schwimmen. In W. Leopold (Hrsg.), *Schwimmen – Lernen und Optimieren*, 26 (S. 7-38). Rüsselsheim: DSTV.