Das Werk führt systematisch und leicht verständlich in Probleme, Methoden und Modelle der Biomechanik des Sports ein. Einer detaillierten Beschreibung verschiedenartiger Untersuchungsziele wie Leistungsoptimierung und Belastungsgestaltung folgt eine informative und anwendungsorientierte Bearbeitung biomechanischer Meßgrößen und Meßverfahren. Den Abschluß bildet die nach einem einheitlichen Schema aufbereitete Darstellung von Modellen der sportmotorischen Technik, der mechanischen Belastung des Bewegungsapparats und der Massenträgheitscharakteristika von Körpersegmenten.

ISBN 3 432 96681 4

Ballreich/
Baumann

Grundlagen der Biomechanik des Sports

Grundlagen der Biomechanik des Sports

Probleme · Methoden · Modelle

Herausgegeben von Rainer Ballreich
und Wolfgang Baumann

111 Abbildungen, 68 Tabellen

Enke

Enke

5 Untersuchungsmethodische Aspekte der Biomechanik des Sports

Rainer Ballreich

Die thematische Formulierung dieses Abschnitts verdeutlicht, daß im Rahmen einer solchen Darstellung keine systematische Aufbereitung untersuchungsmethodischer Bedingungen zu erwarten ist, sondern nur einige – nach Ansicht des Autors für die Biomechanik jedoch zentrale – untersuchungsmethodische Probleme behandelt werden.

Diese beziehen sich zum einen auf Versuchsanordnungen zur Identifikation biomechanischer Einflußgrößen der sportmotorischen Leistung bzw. des sportmotorischen Leistungszustands und zum anderen auf die Güteeigenschaften biomechanischer Einflußgrößen.

5.1 Versuchsanordnungen zur Identifikation biomechanischer Einflußgrößen der sportmotorischen Leistung bzw. des sportmotorischen Leistungszustands

5.1.1 Zum Begriff „Biomechanische Einflußgröße der sportmotorischen Leistung"

Als biomechanische Einflußgrößen der sportmotorischen Leistung bzw. des sportmotorischen Leistungszustands bezeichnen wir biokinematische und biodynamische Merkmale sowohl des Bewegungsablaufs als auch von Struktur und Material des Bewegungsapparats, deren Variation (Änderung) eine Kovariation (Mitänderung) der sportmotorischen Leistungshöhe in einer Sportart bzw. -disziplin bedingt. Hierbei kann eine gleichsinnige oder gegensinnige Kovariation der sportmotorischen Leistungshöhe mit dem Betrag (Intensität) der biomechanischen Einflußgröße vorliegen, wobei die Kovariation auf eine bestimmte Sportart bzw. -disziplin, auf eine bestimmte Leistungshöhe mit definierter unterer und oberer Grenze, auf eine bestimmte Geschlechtszugehörigkeit sowie auf ein bestimmtes Alter zu beziehen ist.

5.1.2 Zum Begriff „Biomechanisches Experiment"

Experimente in der Biomechanik des Sports orientieren sich an einem eindeutig definierten, relativ engen Umfang des Begriffes „Experiment" (*Klauer* 1973, *Selg* und *Bauer* 1971, *Wormser* 1974).

Biomechanisches Experiment: Planmäßig vorbereiteter und absichtlich ausgelöster Vorgang mit dem Ziel, den Einfluß der Variation einer oder mehrerer potentieller biomechanischer Einflußgrößen (unabhängige Variable UV) auf die biomechanische Zielgröße (abhängige Variable AV) objektiv festzustellen unter Konstanthaltung bzw. Kontrolle jener Variablen (Störvariable SV), die die Zielgröße mitbeeinflussen können.

Im folgenden erläutern wir die definitorischen Bezeichnungen „unabhängige Variable", „abhängige Variable" und „Störvariable".

Unabhängige Variable (UV): gegenüber anderen Einflußgrößen isoliert variierte potentielle Einflußgröße, deren Einfluß auf die → abhängige Variable objektiv festgestellt werden soll.

Abhängige Variable (AV): Zielgröße, deren Änderung infolge der Variation potentieller Einflußgrößen (unabhängige Variable) objektiv festgestellt werden soll.

Störvariable (SV): Einflußgröße (der abhängigen Variablen), die im Unterschied zur unabhängigen Variablen plangemäß nicht variiert, sondern konstant gehalten bzw. hinsichtlich ihrer Schwankungsbreite (→ Grad der Reproduzierbarkeit) kontrolliert wird.

5.1.3 Experimentelle biomechanische Versuchsanordnungen

Aus untersuchungsmethodischen Erwägungen erscheint es zweckmäßig, zwischen einer experimentellen und einer quasi-experimentellen Fragestellung bzw. Versuchsanordnung zu unterscheiden.

Unter dem Aspekt einer Optimierung sportmotorischer Leistungen lautet die zentrale experimentelle biomechanische Fragestellung: Welche Änderung der sportmotorischen Leistungshöhe bewirkt die Variation des oder der untersuchungsrelevanten biomechanischen Merkmale (→ unabhängige Variable)?

Die Beantwortung dieser Frage setzt eine Versuchsanordnung voraus, in der die untersuchungsrelevanten biomechanischen Merkmale unter Konstanthaltung bzw. Kontrolle von Störvariablen variiert und ihr Einfluß auf die sportmotorische Leistungshöhe objektiv, d. h. unabhängig vom Untersucher (Experimentator) festgestellt werden kann.

Zur Variation der unabhängigen biomechanischen Variablen: Die (inter- bzw. intraindividuelle) Variation unabhängiger Variablen ist zumindest auf eine zweifache Weise möglich: 1. durch in ihrer Ausführung kontrollierbare trainingsmethodische Maßnahmen zur Variation der untersuchungsrelevanten biomechanischen Merkmale auf dem momentan vorgegebenen sportmotorischen Leistungszustand (Querschnittuntersuchung); 2. durch Änderung der untersuchungsrelevanten biomechanischen Merkmale während eines Trainingsabschnitts (Längsschnittuntersuchung) mit Hilfe einer gezielten Ansteuerung.

Im Zusammenhang mit der experimentellen Fragestellung ist problematisch, ob und inwieweit mit Hilfe von trainingsmethodischen Maßnahmen eine isolierte Variation biomechanischer Merkmale möglich ist. In der Regel werden solche Maßnahmen, außer den untersuchungsrelevanten Merkmalen, die Kovariation eines weiteren Merkmalskomplexes bewirken, so daß die kausale Interpretation (Ursachendeutung) zumindest erschwert ist.

Die Kovariation ist darauf zurückzuführen, daß biomechanische Merkmale sog. organismische Variable sind, die dem untersuchten Organismus anhaften. „Organismische Variable ... sind immer konfundiert, sie hängen immer mit anderen Variablen im Organismus zusammen, wer weiß mit welchen" (*Wormser* 1974). So sind beispielsweise Beschleunigungswege stets mit Gelenkwinkelwegen konfundiert und die Zykluslänge mit der Zyklusfrequenz oder der Beschleunigungskraftstoß mit dem Bremskraftstoß. Ähnliche Überlegungen können in bezug auf die „Ansteuerung untersuchungsrelevanter biomechanischer Merkmale" angestellt werden. Auch hier ist die „gezielte Ansteuerung" biomechanischer Merkmale fraglich. Während eines biomechanisch gestützten Trainings der Diskuswurftechnik führte die angesteuerte Abnahme der Umsprungsphasendauer zu einer unbeabsichtigten und leistungsnegativen Zunahme der einstützigen Übergangsphasendauer (Abb. 2.20).

Die Problematik jeder experimentellen Anordnung und damit auch der biomechanischen liegt in der Zulässigkeit des experimentellen Schlusses, d. h. darin, ob das mit Hilfe einer solchen Anordnung identifizierte biomechanische Merkmal tatsächlich als kausale (verursachende) Einflußgröße wirksam ist oder ein Merkmal bzw. ein Merkmalskomplex (u. a. Sprungbeispiel), das bzw. der mit dieser Größe zusammenhängt (konfundiert).

Experimente führen ausschließlich zu Wenn-dann-Beziehungen, wie bspw.: Wenn bei Vertikalsprüngen der vertikale Beschleunigungsweg variiert wird, dann ändert sich (kovariiert) die vertikale Abfluggeschwindigkeit mit. Da zumindest bei organismischen Variablen nicht auszuschließen ist, daß die kausale(n) Einflußgröße(n) im Experiment nicht direkt erfaßt worden ist (sind), sondern nur indirekt, indem sie mit dem experimentell variierten Merkmal kovariiert (kovariieren), dürfen „experimentell nachgewiesene Kovariationen nicht einfach kausal erklärt werden" (*Klauer* 1973). So sind im o. a. Beispiel (bio-) mechanisch verursachende Einflußgrößen der vertikalen Abfluggeschwindigkeit die Dauer und der Betrag der mittleren vertikalen Beschleunigungskraft sowie die Masse der springenden Versuchsperson, wobei der vertikale Beschleunigungsweg mit diesen Einflußgrößen kovariiert.

Trainingspragmatische Erwägungen relativieren dieses Problem jedoch dahingehend, daß das primäre Ziel „die angesteuerte Änderung der sportmotorischen Leistungshöhe" dann unabhängig davon ist, ob dieses Ziel durch die identifizierte Einflußgröße oder durch mit ihr konfundierte Merkmale bewirkt wird, wenn zieleffektive (einflußgrößenorientierte) Ansteuerungsprogramme verfügbar sind.

Zur Konstanthaltung bzw. Kontrolle von Störvariablen:

Ein weiteres Argument gegen die Zulässigkeit des experimentellen Schlusses im Sinne einer kausalen Identifikation biomechanischer Einflußgrößen der sportmotorischen Leistung bzw. des sportmotorischen Leistungszustands bezieht sich darauf, daß die biomechanischen – wie andere biometrische Beobachtungsgrößen – zufallsbeeinflußt sind. Infolge dieser Einflüsse, d. h. Störvariablen [u. a. Variabilität der „Versuchsobjekte bzw. des Beobachtungsmaterials sowie der Versuchs- und Beobachtungsbedingungen", die man

nicht konstant halten kann (u. a. die sportmotorische Leistungsbereitschaft, Ermüdungsgrad) bzw. aus durchführungsökonomischen Erwägungen im Zusammenhang mit „fehlenden" Wettkampfbestimmungen nicht konstant halten will (u. a. klimatische Faktoren bei Freiluftwettkämpfen, Kunststoffbahnen für Alpinen oder Nordischen Skilauf), wird die biomechanische Zielgröße (sportmotorische Leistung bzw. sportmotorischer Leistungszustand) zu einer Zufallsgröße, d. h. einer „Größe, die unter gegebenen Bedingungen einmal diesen, einmal einen anderen Wert annimmt" (*Sachs* 1973)].

Die Existenz solcher Störvariablen erschwert zusätzlich die kausale Identifikation biomechanischer Einflußgrößen der sportmotorischen Leistung bzw. des sportmotorischen Leistungszustands.

5.1.4 Quasi-experimentelle biomechanische Versuchsanordnungen

Im Unterschied zur experimentellen Anordnung, in der mit Hilfe einer (inter- bzw. intraindividuellen) Variation biomechanischer Bedingungen der sportmotorischen Leistung (bzw. des sportmotorischen Leistungszustands) deren Einfluß auf die Leistungshöhe untersucht wird, variiert man bei der quasi-experimentellen Anordnung nicht Bedingungen der Leistung, sondern man bedient sich der vorgegebenen – nach Leistungshöhe und Leistungsdichte ausgewählten – Variiertheit der sportmotorischen Leistung. Zur Identifikation biomechanischer Einflußgrößen der sportmotorischen Leistung zieht man sowohl die Kovariation (varianz-, korrelations-, faktorenanalytische Prüfverfahren) sowie die Aufeinanderfolge (Sukzession) von Einflußgröße (UV) und Zielgröße (AV) als auch (bio-) mechanische Gesetzmäßigkeiten heran (vgl. 6.4.2).

Unter dem Aspekt der Leistungssteuerung lautet die zentrale quasi-experimentelle biomechanische Fragestellung: Welcher Anteil an der Variation der sportmotorischen Leistungshöhe kommt den untersuchungsrelevanten biomechanischen Merkmalen zu? Die Beantwortung dieser Frage setzt eine Versuchsanordnung voraus, in der die sportmotorische Leistungshöhe variiert. Eine solche Variation ist intra- und interindividuell möglich:

1. durch intraindividuelle Variation im (sub-) maximalen Leistungsbereich, d. h. durch unterschiedliche intraindividuelle sportmotorische Leistungshöhen (intraindividuelle Leistungsvariation);

2. durch Auswahl einer oder mehrerer Personenstichproben, deren Versuchspersonen unterschiedliche sportmotorische Leistungshöhen aufweisen (interindividuelle Leistungsvariation).

Die Problematik der quasi-experimentellen Anordnung liegt in dem gegenüber der experimentellen Anordnung geringeren Grad der Zulässigkeit des experimentellen Schlusses, d. h. darin, daß die mit Hilfe einer solchen Anordnung identifizierten biomechanischen Merkmale nicht in jedem Falle als kausale Einflußgrößen wirksam sind. Eine experimentelle Kontrolle quasi-experimentell identifizierter Einflußgrößen ist daher im allgemeinen notwendig, um die Zulässigkeit des Schlusses zu verfestigen, wonach die Änderung der sportmotorischen Leistungshöhe durch die identifizierten biomechanischen Einflußgrößen zustande kam.

5.2 Zu den Güteeigenschaften biomechanischer Einflußgrößen

Im Zusammenhang mit der Bestimmung biomechanischer Einflußgrößen der sportmotorischen Leistung bzw. des sportmotorischen Leistungszustands ist die „Exaktheit" neben der „Versuchsanordnung" ein weiteres Bestimmungselement. Die Exaktheit orientiert sich an den Kriterien Objektivität, Reliabilität und Validität.

Diese Exaktheitskriterien beziehen wir auf die Methoden der Datengewinnung (Meßwerterstellung) biomechanischer Beschreibungsgrößen bzw. Einflußgrößen und auf diese Größen selbst. Unter der *Objektivität* eines Verfahrens verstehen wir den Grad, in dem die Ergebnisse dieses Verfahrens unabhängig vom Untersucher sind. Der Bedeutungsüberschuß des Begriffs Objektivität wird unter Berücksichtigung des wissenschaftstheoretischen Kriteriums der intersubjektiven Prüfbarkeit durch die inhaltliche Festlegung auf „interpersonelle Übereinstimmung der Untersucher" eingeengt. Da dieser Grad der Unabhängigkeit bzw. Objektivität u. a. vom quantitativen Informationsgehalt der zu untersuchenden biomechanischen Beschreibungsgrößen und von der Genauigkeit der biomechanischen Meßgeräte abhängt, weisen biomechanische Meßergebnisse im allgemeinen einen hohen Grad an (Durchführungs- und Auswertungs-)Objektivität auf.

In Verbindung mit dem Aspekt der Gleichzeitigkeit von sportmotorischem Leistungsvollzug und der Meßwerterstellung biomechanischer Beschreibungsgrößen bzw. Einflußgrößen stellt sich das Problem der *Reliabilität* oder Zuverlässigkeit

dieser Größen. Arbeitshypothetisch bezeichnen wir eine Größe dann als reliabel, wenn ihr Betrag (ihre Intensität) unter denselben kontrollierten Bedingungen eine möglichst kleine Variationsbreite aufweist, kurz, wenn diese Größe reproduzierbar ist. Die Reproduzierbarkeit ist bei einem gleichzeitigen Akt von sportmotorischem Leistungsvollzug und Meßwerterstellung ohne Bedeutung für das Kriterium der Exaktheit, denn in diesem Fall liegt eine eindeutige zeitlich aufeinanderfolgende Zuordnung von Betrag (Intensität) der Beschreibungs- bzw. Einflußgröße und sportmotorischer Leistungshöhe vor. Ein anderer Betrag der Größe bedingt – sofern diese Beschreibungsgröße als Einflußgröße wirksam ist – auch eine andere sportmotorische Leistungshöhe. Wenn ein nicht gleichzeitiger Akt von sportmotorischem Leistungsvollzug und Meßwerterstellung vorliegt, dann ist für das Verfahren der Simulation der sportmotorischen Leistung – u. a. im biomechanischen Test – die Reproduzierbarkeit der jeweiligen Beschreibungsgröße eine notwendige Bedingung für den empirischen Gehalt der experimentellen Aussage.

Ein letztes Exaktheitskriterium betrifft die sogenannte *Validität* oder Gültigkeit. In die Gültigkeitskategorie gehören u. a. der Grad an diagnostischer Eindeutigkeit (Bestimmungsgenauigkeit) des momentanen sportmotorischen Leistungszustands bzw. der Grad an prognostischer Treffsicherheit (Vorhersagegenauigkeit) der zu erwartenden sportmotorischen Leistungshöhe auf der Grundlage von biomechanischen Einflußgrößen, die mit Hilfe von Tests überprüft wurden. Hierbei geht es um die Vorhersage eines Verhaltens (Kriteriumsverhalten), das außerhalb der Testsituation liegt, wobei die Vorhersage das Ergebnis eines induktiven Prozesses (Schließen vom Testverhalten auf das Kriteriumsverhalten) darstellt. Es ist evident, daß der Grad der vorhersagenden Treffsicherheit gleichsinnig variiert mit der Enge des Zusammenhangs zwischen dem Kriteriumsverhalten (Indikator: sportmotorische Leistungshöhe) und dem Testverhalten (Indikator: Betrag der Einflußgröße bzw. -größen). Aus der Forderung nach einem hohen Grad an diagnostischer Eindeutigkeit und vorhersagender Treffsicherheit resultiert die Forderung nach validen biomechanischen Tests zur Erfassung des sportmotorischen Leistungszustands bzw. zur Vorhersage der sportmotorischen Leistungshöhe. Am Beispiel der Sprungkraftmessung erläuterten wir in Abschnitt 2.2.4 ausführlich die diagnostische Eindeutigkeit biomechanischer gegenüber der diagnostischen Mehrdeutigkeit sportmotorischer Tests. Die Sprungkraft kann zumindest durch drei (bio-)mechanische Leistungsindikatoren bestimmt werden, die auf verschiedenen diagnostischen Verfahren beruhen (zwei sportmotorische Tests: „Jump-and-reach-Test" sowie „Sprunggürteltest" und ein biomechanischer Test: „Dynamometrischer Test"). Ordnet man diese Tests bzw. Indikatoren nach dem Exaktheitsgrad bzw. der diagnostischen Eindeutigkeit (Validität) der Sprungkraftmessung, dann steht der biomechanische Test an erster Stelle (Indikator der Sprungkraft: vertikaler Flugweg des KSP), der Sprunggürteltest (Indikator der Sprungkraft: Flugweg eines Hüftpunkts) an zweiter und der Jump-and-reach-Test (Indikator der Sprungkraft: Differenz zwischen Sprung- und Reichhöhe) an dritter Stelle (*Marhold* 1963, *Nigg* 1974). Nach den Ergebnissen von *Marhold (Nigg)* überschätzt der Jump-and-reach-Test infolge seiner Abhängigkeit von motorischen Eigenschaften und Fähigkeiten wie Gelenkigkeit, Dehnfähigkeit und optimalem Timing zwischen der Tippbewegung der Hand und der Umkehrbewegung des Körpers im Fluge die Sprungkraft gegenüber dem biomechanischen Test um durchschnittlich 0,20 m (0,16 m). Im Falle des Sprunggürteltests bewirken schwierig zu standardisierende individuelle Bewegungsausführungen eine Vergrößerung der am Bandmaß ablesbaren Sprunghöhe bis zu ca. 0,05 m. Je nachdem, welches dieser Verfahren man für die Bestimmung der Sprungkraft heranzieht, erhält man unterschiedlich exakte bzw. valide Angaben über die Größe der Sprungkraft. Der Vorteil des biomechanischen Tests an diagnostischer Eindeutigkeit (Validität) und Exaktheit gegenüber dem sportmotorischen Test wird durch den Nachteil eines relativ hohen technisch-apparativen Aufwands erkauft.

5.3 Literatur

Klauer, K. J.: Das Experiment in der pädagogischen Forschung. Düsseldorf 1973

Marhold, G.: Biomechanische Untersuchungen sportlicher Hochsprünge. Diss., Leipzig 1963

Nigg, B. M.: Sprung, Springen, Sprünge. Zürich 1974

Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin 1973

Selg, H., W. Bauer: Forschungsmethoden der Psychologie. Stuttgart–Berlin–Köln–Mainz 1971

Wormser, R.: Experimentelle Psychologie. München 1974