

Geschlechtsspezifische Entwicklung der Anatomie und Gangdynamik im Kindes- und Jugendalter

Andrej König¹, Axel Schölmerich¹ und Nikolaus F. Troje²

¹Ruhr-Universität Bochum

²Queen's University Canada

Zusammenfassung. Im Verlauf der Kindheit werden Unterschiede zwischen Jungen und Mädchen im Körperbau und der Bewegungsdynamik sichtbar. Die Entwicklung von Körperproportionen und der Gangdynamik wurde an einer Querschnittsstichprobe von 27 Mädchen und 27 Jungen im Alter von 4 bis 16 Jahren analysiert. Zur Synthese digitalisierter Point-Light Modelle wurden die Gangmuster der Probanden im dreidimensionalen Raum erfasst. Lineare Diskriminanzfunktionen der Bewegungsinformation erlauben die überzufällig korrekte Zuordnung individueller Gangmuster nach Alter und Geschlecht, wobei die Präzision mit dem Alter ansteigt. Berechnet man die Diskriminanzfunktion als altersspezifische Funktion innerhalb von drei Altersgruppen, ergibt sich zusätzlich zur dynamischen Identifikation eine korrekte Zuordnung auf Grund der strukturellen anatomischen Information. Korrelative Zusammenhänge zwischen altersspezifischen Körperproportionen und dynamischen Aspekten treten dabei für Mädchen und Jungen in unterschiedlichen Entwicklungsphasen auf. Diese Ergebnisse werfen ein neues Licht auf die bisherigen Erkenntnisse der anthropometrischen Forschung und die Entwicklung von geschlechtsspezifischen Bewegungsmustern.

Schlüsselwörter: Geschlechtsspezifische Gangdynamik, geschlechtsspezifische Anatomie, biologische Bewegung, Point-Light-Walker

Gender-specific development of anatomy and walking patterns during childhood and adolescence

Abstract. Differences between boys and girls in anatomic structural features and dynamic movement patterns increase during childhood. We studied anatomic structural properties and dynamic characteristics in a cross-sectional sample of 27 girls and 27 boys ranging from 4 to 16 years of age. The subjects walked and were filmed to create digitized 3-D-point-light models. Linear discriminant functions based on dynamic information classified gender and age of individual walkers above chance level, the accuracy increasing with age. In addition, discriminant functions based on anatomic structural information could identify gender only within separated age-groups. Correlative interactions between age-specific anatomic body structure and dynamic aspects appear to differ for both genders during different developmental phases. These results have implications for anthropometric norms and the development of movement patterns.

Key words: gender-specific walking patterns, gender-specific anatomy, biological motion, point-light-walker

Im Alltag fällt es nicht schwer, anhand struktureller Merkmale wie Körperproportionen oder Kleidungsgewohnheiten zwischen Frauen und Männern zu unterscheiden. Das menschliche Wahrnehmungssystem ist aber darüber hinaus in der Lage, Informationen über das Geschlecht aus biologischer Bewegung präzise herauszulesen. Bewegungsmuster von Lebewesen werden in der Literatur unter dem Überbegriff „Biologische Bewegung“ oder „Biomotion“ zusammengefasst. Wie jedes Bewegungsereignis enthalten menschliche Gangmuster sowohl strukturelle als auch dynamische Informationen über die sich bewegenden Akteure. Struktur beinhaltet Informationen, die über das Bewegungsereignis konstant bleiben, wie zum Beispiel Körpergröße oder Schulterbreite. Unter dynamische Informationen fallen Aspekte, die sich während des Bewegungsablaufs verändern können, wie die Schrittlänge oder der Winkel der Kniebeugung. Die Interaktionen zwischen strukturellen Merkmalen des Körperbaus und dyna-

mischen Aspekten sind äußerst komplex. Ziel unserer Studie ist es, im Kontext der geschlechtsspezifischen körperlichen Entwicklung Zusammenhänge zwischen Anatomie und Gangdynamik vom Vorschul- bis in das Jugendalter zu analysieren.

Die drei wesentlichen Ausgangspunkte unserer Studie sind dabei die Kenntnisse über geschlechtsspezifische anatomische Reifungsprozesse, die altersspezifische Entwicklung der Gangdynamik und die Ergebnisse visueller Wahrnehmungsexperimente.

Betrachtet man als erstes die anatomischen Reifungsprozesse, lassen sich für Mädchen und Jungen spezifische altersabhängige Wachstumsphasen feststellen (Buckup et al., 2001). In den ersten zehn Lebensjahren ergeben sich keine signifikanten Geschlechtsunterschiede in der skeletalen Entwicklung. Erst mit Beginn der Pubeszenz,

die durch einen rapiden Wachstumsschub der Extremitäten gekennzeichnet ist, zeigen sich eindeutige Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen. Dieser erste puberale Wachstumsschub lässt sich bei Mädchen zeitlich zwischen dem 11. bis 14. und bei Jungen zwischen dem 12. bis 15. Lebensjahr einordnen (Buckup et al., 2001). Während der zweiten puberalen Phase, der Adoleszenz, die bei Mädchen zwischen dem 13. und 18. und bei Jungen zwischen dem 14. bis 19. Lebensjahr stattfindet, verlangsamt sich das Längenwachstum, und ein verstärktes Breitenwachstum setzt ein. Bei Jungen kommt es unter dem Einfluss von Testosteron weiterhin zu einer stärkeren Ausbildung der Skelettmuskulatur, dagegen bildet sich bei Mädchen der Anteil des Körperfetts stärker heraus (Buckup et al., 2001). Die Ossifikation der meisten Epiphysenfugen und damit auch das Ende des skeletalen Wachstums erfolgt bei Mädchen um das 17. Lebensjahr und bei Jungen erst um das 20. Lebensjahr (Exner, 1990). Nach einer Metaanalyse von Jürgens, Aune und Pieper (1989) ergab sich bei 50 % aller Männer sogar ein Längenwachstum bis zum 30. Lebensjahr.

Nach dem aktuellen Kenntnisstand der anthropometrischen Forschung sind erste geschlechtsspezifische Unterschiede im Körperbau zwischen dem 11. und 15. Lebensjahr zu erwarten, jedoch ist bei der Interpretation der anatomischen Normdaten aus mehreren Gründen Vorsicht geboten.

Auffällig ist, dass Normwerte auch in der aktuellen Literatur meist vor mehr als 20 Jahren erhoben wurden. Vor dem Trend einer kontinuierlichen Körpergrößenzunahme stellt dies die Repräsentativität durchaus in Frage. Dieser Trend der säkularen Akzeleration kann je nach sozialer Schichtzugehörigkeit (Bakwin & McLaughlin, 1964) und je nach Kulturkreis (Jürgens, Aune & Pieper, 1989; Tanner, Hayashi, Preece & Cameron, 1982; Ohyama et al., 1987) unterschiedliche Verläufe aufweisen.

Wie sich altersabhängige biologische Reifungsprozesse und die daraus resultierenden anatomischen Veränderungen auf die geschlechtsspezifische Gangdynamik auswirken, ist weitgehend ungeklärt. Die Frage nach geschlechtsspezifischen Unterschieden wird in keiner der wenigen Untersuchungen zu dieser Thematik explizit beantwortet.

In einer Studie von Hausdorff, Zeman, Peng und Goldberger (1999) wurde die zeitliche Organisation der Variabilität von Schritt zu Schritt bei Kindern von 3 bis 14 Jahren untersucht. Die zu Grunde liegende Hypothese war, dass auch nach dem 3. Lebensjahr biologische Reifungsprozesse stattfinden, welche sich auf die neuronale Kontrolle der Lokomotion auswirken. Es wurde ein Koeffizient für die Gesamtvariabilität der Schritt-zu-Schritt-Dauer gebildet, dabei zeigte sich eine signifikante altersabhängige Reduktion der Gesamtvariabilität. Eine Normalisierung der Daten, basierend auf Körperhöhe und Beinlänge, trug zu keinerlei Veränderung der Ergebnisse bei. Hausdorff et al. (1999) schließen daraus, dass es sich um einen altersbedingten neuronalen Reifungsprozess handelt, welcher im Entwicklungsverlauf der Lokomotion

zu dynamischen Veränderungen führt, die sich nicht durch strukturelle Veränderungen des Körperbaus begründen lassen. Kontrolliert wurden hier jedoch nur Körperhöhe und Beinlänge, so dass andere strukturelle Merkmale durchaus einen Einfluss auf die Variabilität von Schritt zu Schritt haben könnten.

In einer Studie von van der Linden, Kerr, Hazlewood, Hillman und Robb (2002) wurden Kinder zwischen 8 und 11 Jahren hinsichtlich verschiedener struktureller und dynamischer Parameter untersucht. Hier zeigte sich bei abnehmender körpergrößennormalisierter Gehgeschwindigkeit eine signifikante Reduktion der Schrittfrequenz und Schrittlänge. Bei zunehmender körpergrößennormalisierter Geschwindigkeit findet eine Steigerung der Beugung im Kniegelenk, Hüftgelenk und Knöchel statt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass eine Körpergrößennormalisierung der dynamischen und anatomischen Parameter sinnvoll erscheint, wenn der Fokus auf eine rein altersspezifische Entwicklung der Gangdynamik gerichtet werden soll.

Die Untersuchung der Gangdynamik beschäftigt sich schon seit den 70er Jahren mit Experimenten zur Wahrnehmung von weiblichen und männlichen Bewegungsmustern. Die ersten Versuche, in denen strukturelle und dynamische Information von anderen Eigenschaften wie Oberflächentextur und Kontur getrennt wurde, führte Gunnar Johansson (1973, 1976) durch. Er befestigte kleine Lämpchen an den Hauptgelenken des Körpers einer Person. Die Bewegung der Akteure wurde mit Hilfe verschiedener Blendeneinstellungen so aufgezeichnet, dass am Ende nur noch die Lichtpunkte vor einem schwarzen Hintergrund sichtbar waren. Der perzeptuelle Informationsgehalt dieser so genannten Point-Light-Displays war enorm. Sie konnten von naiven Probanden unmittelbar als menschliche Akteure identifiziert werden. Johansson's Methode kam in einer Vielzahl von Experimenten zur Anwendung. Sie zeigten, dass das menschliche Wahrnehmungssystem in der Lage ist, auch interne Attribute, wie Geschlecht (Barclay, Cutting & Kozlowski, 1978; Kozlowski & Cutting, 1977; Mather & Murdoch, 1994; Troje, 2002), Alter (Montepare & Zebrowitz-McArthur, 1988) und Emotionen (Dittrich, Troscianko, Lea & Morgan, 1996; Pollick, Paterson, Bruderlin & Sanford, 2001) aus Point-Light-Displays präzise herauszulesen.

Kozlowski und Cutting (1977) versuchten als Erste, die diagnostische Information für die Geschlechtererkennung der Gangmuster zu extrahieren. Die Ergebnisse zeigten, dass Beobachter in der Lage waren, bei 63 % ($p < .05$) der dynamischen Point-Light-Displays das Geschlecht korrekt zu identifizieren. Des Weiteren wurde der Effekt der Verdeckung einzelner Körperpartien auf die Klassifikationsleistung untersucht. Hier fand eine deutliche Reduzierung der Geschlechtsklassifikationsleistung statt, jedoch schien die Dynamik einzelner Körperteile, wie zum Beispiel der Knöchel, auszureichen, um das Geschlecht überzufällig korrekt zu identifizieren (54 %, $p < .05$). Kozlowski und Cutting (1977) gehen davon aus, dass der Gang jedes Individuums eine gewisse „Grammatik“ bein-

haltet und Geschlechtsinformationen auf diese Weise über den gesamten Körper verteilt sind.

Mather und Mordoch (1994) variierten in synthetisch erzeugten Stimuli systematisch die Schulter- und Hüftbreite und die lateralen Pendelbewegungen ihrer Point-Light-Displays. Dabei sollte Männlichkeit durch ein positives und Weiblichkeit durch ein negatives Schulter-Hüft-Verhältnis repräsentiert werden. Eine starke laterale Pendelbewegung sollte als dynamische Informationsquelle für Männlichkeit dienen, und eine schwache Pendelbewegung stand für eine weibliche Dynamik. Die Ergebnisse zeigen, dass die Dynamik bei der Klassifikation des Geschlechts in diesem Experiment eine bedeutendere Rolle spielte als die Struktur. Die Kombination einer weiblichen Struktur mit einer männlichen Dynamik wurde von den Beobachtern trotzdem als männlich wahrgenommen. Umgekehrt wurde eine männliche Struktur, kombiniert mit einer weiblichen Dynamik, als weiblich klassifiziert.

Montepare und Zebrowitz-McArthur (1988) gingen der Frage nach, ob Beobachter in der Lage sind, Alter und Geschlecht anhand der Gangdynamik zu erkennen. Sie zeichneten für vier Altersgruppen (Kinder: 5–7 J., Jugendliche: 13–14 J., Junge Erwachsene: 26–28 J., Ältere Erwachsene: 65–70 J.) jeweils zwei weibliche und zwei männliche Point-Light-Displays auf. Es zeigte sich ein signifikanter linearer Zusammenhang zwischen wahrgenommenem Alter und realem Alter. Beobachter waren jedoch nur in der Lage, das relative Alter korrekt einzuschätzen. Die Mittelwerte der absoluten Alterseinschätzungen wichen stark vom realen Alter ab. Das Alter der Kinder und Jugendlichen wurde dabei überschätzt und das Alter der älteren Erwachsenen unterschätzt. Die Alters-einschätzungen für die jungen Erwachsenen entsprachen dagegen nahezu ihrem realen Alter. Zwischen Geschlechtsklassifikation und Alterseinschätzung gab es keine signifikanten Zusammenhänge, was möglicherweise in der insgesamt geringen Anzahl an Point-Light-Displays lag.

Ziel unserer Studie ist es, strukturelle und dynamische Geschlechtsunterschiede im Entwicklungsverlauf und altersbedingte Entwicklungsprozesse innerhalb eines Geschlechts zu beschreiben und deren Zusammenhänge zu analysieren. Als methodische Grundlage dienen auf linearen Diskriminanzfunktionen basierende Klassifikatoren, die die unabhängige Betrachtung struktureller und dynamischer Aspekte eines Gangmusters ermöglichen (s. Methode). Dabei wird zwischen einem globalen und einem altersspezifischen Geschlechtsklassifikator unterschieden. Aufgabe des globalen Klassifikators ist die Erfassung eines singulären Merkmalkomplexes, der unabhängig vom Alter zwischen Mädchen und Jungen differenziert. Dagegen soll der altersspezifische Klassifikator Geschlechtsdifferenzen in Abhängigkeit vom Alter beschreiben und basiert daher je nach Altersgruppe auf qualitativ verschiedenen geschlechtsspezifischen Merkmalen. Der altersspezifische Klassifikator schließt jedoch auch geschlechtsspezifische Merkmale des globalen Klassifikators mit ein, da diese Merkmale in allen Altersgruppen auftreten.

Die Ergebnisse aus der anthropometrischen Forschung, den Untersuchungen zur Entwicklung der Gangdynamik und den visuellen Wahrnehmungsexperimenten lassen drei grundlegende Fragen weitgehend unbeantwortet, die in dieser Arbeit empirisch untersucht werden sollen:

1. Ab welchem Alter treten erste skeletale und muskuläre Geschlechtsdifferenzen auf und wie verläuft deren Entwicklung?

2. Ab welchem Alter treten erste Geschlechtsdifferenzen in der Gangdynamik auf und wie verläuft deren Entwicklung?

3. Existieren Zusammenhänge zwischen der skeletalen und muskulären Entwicklung und der Gangdynamik?

Hinter diesen Fragestellungen steht die Hypothese, dass mit Beginn der Pubeszenz erste geschlechtsspezifische Unterschiede im Körperbau zu erwarten sind, welche sich vermutlich auch in der Gangdynamik widerspiegeln. Es besteht darüber hinaus auch die Möglichkeit, dass zwischen Mädchen und Jungen bereits zu einem früheren Entwicklungszeitpunkt, in dem es noch keine signifikanten skeletalen und muskulären Geschlechtsdifferenzen gibt, Unterschiede in der Gangdynamik auftreten.

Methode

Stichprobenbeschreibung

Die Gesamtstichprobe setzte sich aus 27 Mädchen und 27 Jungen ($N = 54$) zwischen 4 und 16 Jahren zusammen. Die 11- bis 16-jährigen Jugendlichen waren überwiegend Schüler einer Düsseldorfer Gesamtschule. Die Jüngeren waren Kinder von Studierenden der Psychologie, die für die Teilnahme Versuchspersonenstunden bekamen.

Für die statistische Datenanalyse wurde die Gesamtstichprobe in drei gleichgroße Altersgruppen (A1, A2, A3) geteilt (s. Tab.1). Jede der drei Altersgruppen setzt sich aus der gleichen Anzahl an Mädchen ($n = 9$) und Jungen ($n = 9$) zusammen. Die Einteilung der Altersgruppen erfolgte angelehnt an den beschriebenen Forschungsstand zur skeletalen Entwicklung. In der prä-pubeszenten Gruppe A1 werden keine Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen erwartet, in der pubeszenten Gruppe A2 sollten dagegen erste Geschlechtsdifferenzen im Körperbau auftreten, welche sich in der adoleszenten Gruppe A3 stärker ausprägen.

Versuchsablauf

Um keine unnatürlichen oder übertriebenen geschlechtsstereotypen Gangmuster zu provozieren, waren den Kindern und Jugendlichen und deren Eltern die konkreten Fragestellungen der Studie nicht bekannt. Alle Teilnehmer wurden jedoch im Vorfeld über den formellen Ablauf des Versuchs detailliert aufgeklärt.

Tabelle 1. Mittelwerte und Standardabweichungen der erhobenen anthropometrischen Maße für die drei Altersgruppen

	Altersgruppe (A1) ^a 4 bis 7 Jahre		Altersgruppe (A2) ^a 8 bis 12 Jahre		Altersgruppe (A3) ^a 13 bis 16 Jahre	
	♀	♂	♀	♂	♀	♂
Alter (Monate)	68.4 (16.0)	70.3 (18.4)	128.3 (13.9)	130.4 (12.1)	173.8 (15.6)	176.1 (17.3)
Gewicht (kg)	23.3 (6.7)	21.7 (3.5)	39.6 (8.0)	42.0 (12.3)	60.1 (8.9)	59.8 (15.0)
Körpergröße (cm)	116.3 (8.3)	118.2 (11.8)	143.7 (10.7)	148.3 (12.6)	161.8 (5.6)	167.5 (8.4)
Schulterbreite (cm)	25.5 (2.6)	25.2 (1.8)	31.9 (2.2)	34.1 (4.6)	37.1 (1.9)	39.5 (3.9)
Hüftbreite (cm)	18.7 (2.7)	17.4 (2.5)	22.8 (2.8)	23.7 (3.4)	27.9 (2.7)	28.3 (3.8)
Beinlänge (cm)	62.9 (5.6)	62.3 (7.9)	82.2 (7.1)	82.1 (8.1)	94.2 (3.0)	90.3 (3.4)

Anmerkung: ^a Jede der drei Altersgruppen setzt sich aus der gleichen Anzahl an Mädchen ($n = 9$) und Jungen ($n = 9$) zusammen.

Die Aufzeichnungen fanden zum größten Teil im Labor für Biomotion¹ der Ruhr-Universität Bochum statt. Einige Jugendliche wurden in einem abgedunkelten Klassenraum einer Düsseldorfer Gesamtschule aufgezeichnet. Der Versuchsablauf war ansonsten identisch.

Zur Bewegungsaufzeichnung wurde das Motion Capture System Vicon 512 (Oxford Metrics, UK) mit insgesamt neun CCD Hochgeschwindigkeitskameras (Pulnix TM 6710; Oxford Metrics, UK) verwendet. Das System ist in der Lage, die Positionen von Reflektormarkern mit einer räumlichen Genauigkeit von 1 mm und einer zeitlichen Auflösung von 120 Hz im dreidimensionalen Raum zu erfassen. Das Marker-Set für eine Versuchsperson bestand aus 35 Reflektormarkern (Durchmesser: 12 mm), welche mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband direkt auf die Haut geklebt wurden und zum Teil auf Schweißbändern und Ballettschuhen bereits befestigt waren. Die Markerpositionen entsprachen dabei den Empfehlungen des Vicon Manuals.

In der Mitte der Versuchsräume lag eine 7 m lange und 70 cm breite rote Stoffbahn, die als Markierung des Aufnahmevolumens diente. Während der Aufzeichnungen waren zwei Versuchsleiter anwesend, wobei einer die Kinder instruierte und der Zweite das Motion Capture System bediente. Bei den jüngeren Kindern befanden sich meist auch die Eltern im Raum. Um mögliche Unsicherheiten der Kinder und Jugendlichen gering zu halten, wurden weibliche Teilnehmer von einer weiblichen Versuchsleiterin und männliche Teilnehmer von einem männlichen Versuchsleiter mit den Reflektormarkern beklebt.

Die Probanden wurden aufgefordert, auf der roten Stoffbahn solange hin und her zu gehen, bis der Versuchsleiter das Ende des Versuchs ankündigt. Bezüglich der Gehgeschwindigkeit wurden keine Vorgaben gemacht. Nach einer Eingewöhnungsphase von mindestens 5 min begann die Aufzeichnung des ersten Durchgangs (Trial). Den Versuchspersonen war nicht bekannt, zu welchem Zeitpunkt die Aufzeichnungen stattfinden. Von jeder Versuchsperson wurden 4 bis 8 Trials aufgezeichnet, wobei ein Trial dem einmaligen Abschreiten der roten Stoffbahn

entspricht und damit je nach Schrittlänge 6 bis 9 Schritte umfasst. Die gesamte Versuchsdauer betrug pro Teilnehmer 35 bis 50 min.

Zur Rekonstruktion der dreidimensionalen Bewegungsdaten wurde das Vicon Workstation Softwarepaket (Oxford Metrics, UK) und zur biomechanischen Modellierung und Platzierung der 15 virtuellen Marker das Programm Bodybuilder (Oxford Metrics, UK) verwendet. Die 15 virtuellen Marker, auf denen die weitere Datenanalyse basiert, befanden sich in den Mittelpunkten folgender Gelenke: Knöchel, Knie, Hüfte, Handgelenk, Ellbogen, Schulter, am oberen Halswirbel und im Zentrum des Schädels.

Datenanalyse auf Basis eines linearen Modells

Ziel ist es, die aufgezeichneten Ausgangsdaten der 15 virtuellen Marker einer jeden Versuchsperson mit Hilfe mathematischer Transformationen so umzuformen, dass die Anwendung standardisierter Methoden der linearen Statistik möglich wird, der Informationsverlust jedoch minimal bleibt. Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Methoden basieren vorwiegend auf einem von Troje (2002) entwickeltem, mathematischem Modell zur Zerlegung biologischer Bewegung in einzelne Komponenten. Kernstücke dieses Modells zur Linearisierung von Motion Capture Daten sind dabei die Fourier Analyse und die Hauptkomponentenanalyse.

Sieht man den Gang eines Individuums als eine Zeitabfolge verschiedener Körperhaltungen, kann jede einzelne Körperhaltung durch die x-, y- und z-Koordinaten der 15 virtuellen Marker im Raum beschrieben werden. Dies entspricht einem 45-dimensionalen Vektor. Ein Trial beinhaltet bei einer zeitlichen Auflösung von 120 Hz 700 einzelne Körperhaltungen, die sich in einer 45*700-dimensionalen Matrix darstellen lassen. Zur Linearisierung werden die Bewegungsdaten eines Trials mit Hilfe einer Fourier Zerlegung zweiter Ordnung in die erste und zweite Harmonische zerlegt:

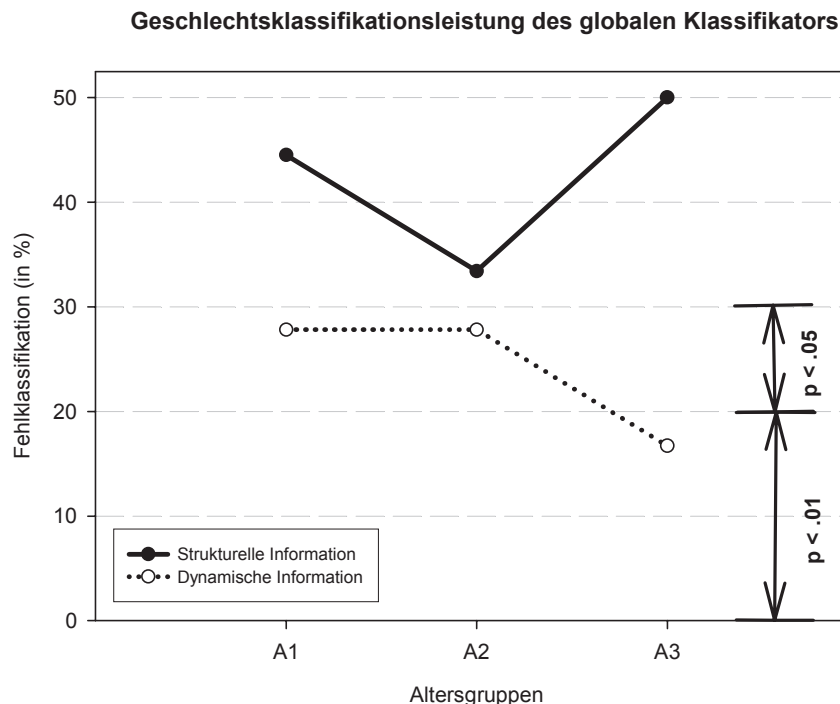
$$p_j(t) = p_{j,0} + p_{j,1}\sin(\omega_j t) + p_{j,2}\cos(\omega_j t) + p_{j,3}\sin(2\omega_j t) + p_{j,4}\cos(2\omega_j t)$$

¹ www.biomotionlab.ca.

$p_j(t)$ beschreibt den individuellen Gang einer Versuchsperson (j) entlang der Zeitachse (t). Dabei ist $p_{j,0}$ die Durchschnittskörperhaltung einer Versuchsperson, $p_{j,1}$, $p_{j,2}$, $p_{j,3}$ und $p_{j,4}$ sind Richtungsvektoren, die Informationen über Sinus- und Cosinus-Anteile enthalten und ω_j beschreibt die fundamentale Frequenz entlang der Zeitachse (t). Die 45×700 -dimensionale Ausgangsmatrix wird so mit Hilfe der Fourier Zerlegung auf ein 226-dimensionales Modell reduziert, da jede der fünf Komponenten einem 45-dimensionalen Vektor und die fundamentale Frequenz (ω) einem eindimensionalen Vektor entsprechen ($5 \times 45 + 1 = 226$). Die ersten beiden Harmonischen der Fourier Zerlegung klären im Mittel bereits 99.3% der Gesamtvarianz auf. Dieser geringe Informationsverlust ergibt sich aus der Periodizität des menschlichen Ganges. Um intra-individuelle Subjektvarianzen zu reduzieren, wurde für die weitere Datenanalyse aus den vorhandenen Trials eines jeden Probanden ein Durchschnittsgangmuster gebildet.

Für die Entwicklung eines linearen Geschlechts- und Altersklassifikators muss die Dimensionalität des Modells jedoch soweit reduziert werden, dass sie die Anzahl der Probanden unterschreitet. Eine effektive Methode zur Dimensionsreduktion bietet dabei die Hauptkomponentenanalyse. Dazu wird aus allen Probanden eine „Walkermatrix“ (W) gebildet, bei der jede Spalte (w_1, w_2, \dots, w_{54}) die individuellen Gangmuster $p_j(t)$ beinhaltet. Nach der Anwendung der Hauptkomponentenanalyse ergibt sich ein so genannter „Walkerspace“ (W_{PCA}):

$$W_{PCA} = W_0 + VK$$



Anmerkung: Die mit $p < .05$ und $p < .01$ gekennzeichneten Bereiche geben die auf diesem Niveau signifikante Abweichung von der zufällig zu erwarteten Klassifikationsleistung an.

Abbildung 1. Geschlechtsklassifikationsleistung des globalen Klassifikators.

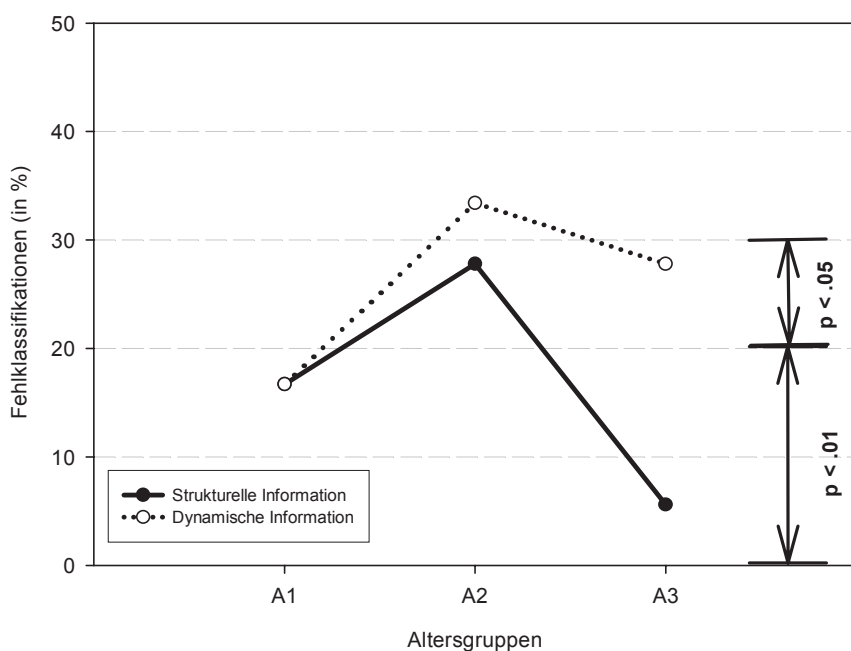
Dabei enthält W_0 in jeder der 54 Spalten den Durchschnittsläufer aller Versuchspersonen. Die Matrix V beinhaltet in jeder ihrer 53 Spalten die so genannten „Eigenwalker“ und die Matrix K die dazugehörigen individuellen Gewichte einer jeden Versuchsperson. Da das Interesse dieser Arbeit nicht auf körpergrößenbedingten Geschlechtsunterschieden liegt, wurden alle Daten des W_{PCA} bezüglich der Körpergröße und Schrittfrequenz normalisiert. Je nach verwendeter Anzahl von „Eigenwalker“ (V) lässt sich nun die Dimensionalität des W_{PCA} flexibel variieren.

Im folgenden Abschnitt werden die Konstruktion des globalen und des altersspezifischen Geschlechtsklassifikators und die des Altersklassifikators beschrieben. Die niedrig-dimensionale Repräsentation der Gangmuster ermöglicht es nun, lineare Diskriminanzfunktionen (c) für die Merkmale Geschlecht und Alter zu bestimmen. Zur Berechnung von c wird ein Reihenvektor (r) benötigt, in dem das Geschlecht oder Alter einer jeden Versuchsperson in dichotomer Weise ($-1/+1$) kodiert ist. Die Werte für c ergeben sich aus der Lösung der folgenden linearen Gleichung:

$$cK = r$$

Stimmt das Vorzeichen von c mit dem in r kodierten Vorzeichen überein, gilt das Gangmuster als korrekt klassifiziert. Auf Grund der relativ geringen Stichprobengröße wurde für die Bestimmung von c eine „Jack-Knife-Prozedur“ angewendet. Dabei wird zunächst der Datensatz einer Versuchsperson aus den Ausgangsdaten entfernt, mit den restlichen Daten werden nach dem oben beschriebenen Verfahren der W_{PCA} und c berechnet. Im nächsten Schritt wird die entfernte Versuchsperson auf die erhaltenen Eigenwalker (V) der restlichen Versuchspersonen projiziert. Die sich daraus ergebenden Gewichte (K) für die Daten der entfernten Versuchsperson können nun zur Lösung der linearen Gleichung $cK = r$ genutzt werden. Ausgangsbedingung für die Berechnung von c beim globalen Geschlechtsklassifikator ist ein W_{PCA} bestehend aus allen 54 Gangmustern. Dagegen wird beim altersspezifischen Geschlechtsklassifikator für jede Altersgruppe (s. Tab. 1) ein separater W_{PCA} gebildet. Beim Altersklassifikator werden für Mädchen und Jungen jeweils zwei W_{PCA} gebildet. Im ersten W_{PCA} soll c zwischen der Altersgruppe A1 und A2 differenzieren und im Zweiten zwischen A2 und A3. Für alle Klassifikatoren werden gesonderte Diskriminanzfunktionen basierend auf dynamischer oder struktureller Information berechnet. Die Information der Gangdynamik befindet sich dabei in den beiden Harmonischen der Fourier

Geschlechtsklassifikationsleistung des altersspezifischen Klassifikators



Anmerkung: Die mit $p < .05$ und $p < .01$ gekennzeichneten Bereiche geben die auf diesem Niveau signifikante Abweichung von der zufällig zu erwarteten Klassifikationsleistung an.

Abbildung 2. Geschlechtsklassifikationsleistung des altersspezifischen Klassifikators.

Zerlegung ($p_{j,1}$ bis $p_{j,4}$) und die des Körperbaus in der Durchschnittskörperhaltung ($p_{j,0}$). Die Güte der einzelnen Klassifikationsleistungen wird mit Hilfe des Binomial-Tests anhand der Anzahl der jeweiligen Fehlklassifikationen auf statistische Signifikanz überprüft.

Das mathematische Modell von Troje (2002) ermöglicht es zwar, strukturelle und dynamische Informationen gezielt auszuwählen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die beiden Aspekte unabhängig voneinander sind. Um dies zu überprüfen, werden die Korrelationskoeffizienten zwischen den Klassifikationsleistungen von c, basierend auf dynamischer und struktureller Information, berechnet.

Bei der auf struktureller Information basierenden Diskriminanzfunktion ergeben sich für den globalen Geschlechtsklassifikator in keiner der drei Altersgruppen signifikante Geschlechtsunterschiede im Körperbau (s. Abb. 1). Dagegen zeigen sich in der Gangdynamik schon ab der Altersgruppe A1 signifikante Geschlechtsdifferenzen (s. Abb. 1). Es findet sich kein signifikanter korrelativer Zusammenhang zwischen den Diskriminanzfunktionen, basierend auf struktureller und dynamischer Information ($r = .11, df = 53; ns$).

In Abbildung 2 sind die Klassifikationsleistungen des altersspezifischen Geschlechtsklassifikators dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich anhand struktureller Information die deutlichsten Geschlechtsdifferenzen feststellen lassen, wohingegen dynamische Information nur in den Altersgruppen A1 und A3 zwischen Mädchen und Jungen differenziert. Es ergibt sich für alle drei Altersgruppen kein signifikanter korrelativer Zusammenhang zwischen den Diskriminanzfunktionen, basierend auf

Eine positive Korrelation würde einen Zusammenhang zwischen Aspekten der Gangdynamik und des Körperbaus nahe legen.

Ergebnisse

Geschlechtsklassifikationsleistung

In den Abbildungen 1 und 2 sind die prozentualen Fehlklassifikationen des globalen und des altersspezifischen Geschlechtsklassifikators dargestellt. Mit Hilfe des Binomial-Tests wurde die Abweichung vom Zufallsniveau (50%) überprüft.

Tabelle 2. Altersklassifikationsleistung und Korrelationen zwischen Struktur und Dynamik für Mädchen und Jungen

	Jungen		Mädchen	
	A1 vs A2	A2 vs A3	A1 vs A2	A2 vs A3
Fehlklassifikation Dynamische Information	22.3%*	22.3%*	11.2%**	33.4%
Fehlklassifikation Strukturelle Information	16.7%**	5.6%**	11.2%**	22.3%*
Korrelation (r_b) zwischen Dynamik und Struktur	.32	.59**	.83**	.33

Anmerkungen: $df = 8$; * $p < .05$. ** $p < .01$.

struktureller und dynamischer Information ([A1 $r = .29$, $df = 8$; ns] [A2 $r = .45$, $df = 8$; ns] [A3 $r = .22$, $df = 8$; ns]), wenngleich die Koeffizienten alle positiv sind.

Bei einem Vergleich der beiden Geschlechtsklassifikatoren wird deutlich, dass die Gesamtklassifikationsleistung des globalen Klassifikators in Bezug auf strukturelle Information signifikant niedriger ist als beim altersspezifischen Klassifikator ($\chi^2(1, N = 108) = 6.125, p < .05$). Für die dynamische Information ergeben sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Geschlechtsklassifikatoren.

Altersklassifikationsleistung

Die Ergebnisse des Altersklassifikators (s. Tab. 2) machen deutlich, dass lineare Diskriminanzfunktionen, basierend auf strukturellen oder dynamischen Informationen, effizient zwischen verschiedenen Altersgruppen differenzieren können. Allerdings führen strukturelle und dynamische Informationen je nach Geschlecht und Altersgruppendifferenzierung zu unterschiedlichen Klassifikationsleistungen. Des Weiteren zeigt sich, dass das Ausmaß körperlicher und dynamischer Altersentwicklungen und deren korrelative Zusammenhänge je nach Geschlecht unterschiedlich verlaufen.

Diskussion

Die Ergebnisse unserer Arbeit machen deutlich, dass geschlechtsspezifische Merkmale, sowohl im Körperbau als auch in der Gangdynamik, kodiert sind und sich bereits im Vorschulalter manifestieren.

In der Altersgruppe der 4- bis 7-Jährigen zeigen sich die deutlichsten geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Gangdynamik anhand der stärker abgespreizten Ellenbogen und einer stärkeren lateralen Pendelbewegung des Oberkörpers bei den Jungen. Die Ellenbogen der Mädchen werden dichter am Oberkörper vorbeigeführt und die Unterarme sind seitlich abgespreizt. Das Aufsetzen der Füße wirkt dagegen sowohl bei den Mädchen, als auch bei den Jungen weniger koordiniert als in den folgenden beiden Altersgruppen. Bildlich gesprochen entspricht die Dynamik der männlichen PLW einem „Cowboygang“ und die Gangmuster der weiblichen PLW wirken „prinzessinnenhaft“. Diese grundlegenden geschlechtsspezifischen Differenzen in der Gangdynamik finden sich auch in den Altersgruppen der 8- bis 12-Jährigen und 13- bis 16-Jährigen. In der Gruppe A2 zeigt sich bei beiden Geschlechtern eine geringfügigere laterale Pendelbewegung des Oberkörpers und auch die geschlechtstypische Armhaltung scheint weniger ausgeprägt, aber dennoch erkennbar. In der Gruppe der 13- bis 16-Jährigen manifestieren sich die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Gangdynamik bei den Mädchen in einem stärkeren Voreinandersetzen der Füße (ähnlich dem „Catwalk“) und einer relativ statischen Oberkörperposition im Vergleich zu den Jungen. Diese weisen wie-

derum eine deutlichere laterale Pendelbewegung des Oberkörpers auf, nach Außen abgespreizte Ellenbogen und einen eher o-beinigen Gang. Diese qualitative Beschreibung der Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen in der Gangdynamik unterstützt die Hypothese, dass ein globaler geschlechtsspezifischer Merkmalkomplex existiert, der im Verlauf der Entwicklung prominenter wird. Auch die Ergebnisse einer Folgeuntersuchung (König, 2005) zeigen, dass die Geschlechtsklassifikationsleistung von realen Versuchspersonen mit steigendem Alter der PLW zunimmt.

Da der altersspezifische Geschlechtsklassifikator auf Basis struktureller Information signifikant weniger Fehlklassifikationen produziert hat als der globale Klassifikator, scheinen geschlechtsspezifische Unterschiede in jeder Altersgruppe auf qualitativ verschiedenen anatomischen Merkmalen zu beruhen. Diese Annahme wird durch die nahe am Zufallsniveau liegende Leistung des globalen Geschlechtsklassifikators gestützt. Die bereits im Vorschulalter auftretenden geschlechtsspezifischen Unterschiede im Körperbau sind vor dem Hintergrund anthropometrischer Erkenntnisse nicht zu erklären. Die extrem niedrige Anzahl an Fehlklassifikationen (5.6%, s. Abb. 2) des altersspezifischen Geschlechtsklassifikators bei den 13- bis 16-jährigen Mädchen und Jungen steht jedoch im Einklang mit den Ergebnissen der anthropometrischen Forschung. Die im Vergleich zu den anderen beiden Altersgruppen hohe Anzahl an Fehlklassifikationen (27.8% s. Abb. 2) in der Gruppe A2 lässt sich damit begründen, dass in diesem Altersbereich für beide Geschlechter die größten reifungsbedingten Streuungen erwartet werden (Buckup et al., 2001), so dass die Bestimmung einer Diskriminanzfunktion, basierend auf struktureller Information geringere Klassifikationsleistungen erzielt.

Bei Betrachtung der Gangdynamik zeigen sich für den globalen Geschlechtsklassifikator in allen drei Altersgruppen signifikante Geschlechtsunterschiede. Demnach existiert ein einziger Komplex an dynamischen Merkmalen, der unabhängig vom Alter zwischen Mädchen und Jungen differenziert. Diese typisch weibliche bzw. männliche Gangdynamik ist nach den Ergebnissen des globalen Geschlechtsklassifikators bereits zu einem vorpubertären Entwicklungszeitpunkt vorhanden und prägt sich in der Adoleszenz weiter aus (s. Abb. 1). Diese Erkenntnis könnte auch eine Erklärung für die bedeutendere Rolle dynamischer Information bei der Geschlechtererkennung in Wahrnehmungsexperimenten (Mather & Mordoch, 1994; Kozlowski & Cutting, 1977) sein. Eine altersunabhängige geschlechtsspezifische Gangdynamik bietet demnach eine bessere Informationsquelle für den Betrachter als strukturelle Informationen, die nur in Abhängigkeit vom Alter interpretiert werden können. Möglicherweise kehren sich im Verlauf der körperlichen Entwicklung die Bedeutungen anatomischer Merkmale sogar um und liefern somit bezüglich des Geschlechts eine doppeldeutige Botschaft. So kann ein positives Körpergrößen-Beinverhältnis in einem bestimmten Alter besonders weiblich sein und zu einem anderen Alterszeitpunkt für einen männlichen Körperbau stehen. Da die Altersspanne der untersuchten Kinder und Jugendlichen von 4 bis 16 Jahren reicht, muss

davon ausgegangen werden, dass die körperliche Entwicklung auch in der ältesten Gruppe noch nicht abgeschlossen ist. Körperproportionen unterliegen im Erwachsenenalter jedoch auch ständigen Veränderungen, so dass eine Lebensspannenperspektive die Erkenntnisse dieser Studie erweitern könnte.

Der Altersklassifikator macht deutlich, dass die Entwicklung struktureller und dynamischer Aspekte bei Mädchen und Jungen unterschiedlich verläuft. In bestimmten Entwicklungsphasen weisen altersspezifische Unterschiede in der Gangdynamik und im Körperbau je nach Geschlecht einen hohen korrelativen Zusammenhang auf und in anderen Phasen nicht. Dynamische und strukturelle altersspezifische Merkmale korrelieren in Entwicklungsphasen, in denen es zu rapiden körperlichen Veränderungen kommt, signifikant miteinander. Diese Entwicklungszeitpunkte stimmen mit dem Beginn der Pubeszenz überein und sind demnach bei Mädchen früher anzusiedeln als bei Jungen (s. Tab. 2).

Die Fragestellung, ob die Gangdynamik von Mädchen und Jungen unabhängig vom Körperbau ist, lässt sich anhand der gewonnenen Ergebnisse nicht eindeutig beantworten. Einerseits ergeben sich für die beiden Geschlechtsklassifikatoren nur geringe positive Korrelationen zwischen dynamischer und struktureller Information, andererseits weist der Altersklassifikator in Abhängigkeit von Geschlecht und Entwicklungszeitpunkt deutliche signifikante Zusammenhänge zwischen Anatomie und Gangdynamik auf. Die Ergebnisse zeigen, dass eine weibliche oder männliche Gangdynamik nicht mit einem entsprechend weiblichen oder männlichen Körperbau einhergehen muss.

Insgesamt betrachtet verdeutlichen die Ergebnisse unserer Studie, dass der menschliche Gang nicht nur der Fortbewegung dient, sondern auch bei Kindern und Jugendlichen Informationen über Eigenschaften wie Geschlecht und Alter enthält. Die Ergebnisse stehen dabei konträr zum aktuellen anthropometrischen Forschungsstand, da sich bereits im Vorschulalter geschlechtsspezifische Unterschiede im Körperbau und der Gangdynamik zwischen Mädchen und Jungen zeigen. Dies wirft die Frage auf, wie die Geschlechtsspezifität von Gangmustern an Kinder weitergegeben wird. Sind es Lernprozesse, die im Sinne des Modelllernens zu einer geschlechtstypischen Gangdynamik führen oder sind es neuronale und anatomische Reifungsprozesse, die die Entwicklung der Gangdynamik maßgeblich bestimmen? Zukünftig könnte demnach eine Analyse von Sozialisationsfaktoren wie Erziehung, Rollenvorbilder, Ernährung, sportliche Betätigung und Schicht- oder Kulturzugehörigkeit einen weiteren Beitrag für das tiefere Verständnis von Reifungsprozessen und deren Auswirkungen auf die Gangdynamik leisten.

Literatur

Bakwin, H. & McLaughlin, S. M. (1964). Secular increase in height: Is the end in sight? *Lancet*, 13, 1195–1196.

- Barclay, C. D., Cutting, J. E. & Kozlowski, L. T. (1978). Temporal and spatial factors in gait perception that influence gender recognition. *Perception & Psychophysics*, 23, 145–152.
- Buckup, K., Linke, L. C., Pothmann, M., Cordier, W., Wagner, N. & Albrecht, M. (2001). *Kinderorthopädie* (2. Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Dittrich, W. H., Troscianko, T., Lea, S. & Morgan, D. (1996). Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance. *Perception*, 25, 727–738.
- Exner, G. U. (1990). *Normalwerte in der Kinderorthopädie: Wachstum und Entwicklung*. Stuttgart: Thieme.
- Hausdorff, J. M., Zeman, L., Peng, C. K. & Goldberger, A. L. (1999). Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children. *Journal of Applied Physiology*, 86, 1040–1047.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, 14, 201–211.
- Johansson, G. (1976). Spatio-temporal differentiation and integration in visual motion perception. *Psychological Research*, 38, 379–393.
- Jürgens, H. W., Aune, I. A. & Pieper, U. (1989). *Internationaler anthropometrischer Datenatlas*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz.
- König, A. (2005, September). *Visuelle Wahrnehmung von Gangmustern im Entwicklungsverlauf*. Poster für die 17. Tagung der Fachgruppe Entwicklungspsychologie der DGPs, Bochum, Germany.
- Kozlowski, L. T. & Cutting, J. E. (1977). Recognizing the sex of a walker from dynamic point-light display. *Perception & Psychophysics*, 21, 575–580.
- Mather, G. & Murdoch, L. (1994). Gender discrimination in biological motion displays based on dynamic cues. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 258, 273–279.
- Montepare, J. M. & Zebrowitz-McArthur, L. (1988). Impressions of people created by age-related qualities of their gaits. *Journal of Personality and Social Psychology*, 55, 547–556.
- Ohyama, S., Hisanaga, A., Inamasu, T., Yamamoto, A., Hirata, M. & Ishinishi, N. (1987). Some secular changes in body height and proportions of Japanese medical students. *American Journal of Physical Anthropology*, 73, 179–183.
- Pollick, F. E., Paterson, H. M., Bruderlin, A. & Sanford, A. J. (2001). Perceiving affect from arm movement. *Cognition*, 82, B51–61.
- Tanner, J. M., Hayashi, T., Preece, M. A. & Cameron, N. (1982). Increase in length of leg relative to trunk in Japanese children and adults from 1957–1977: comparison British and Japanese Americans. *Annals of Human Biology*, 9, 411–423.
- Troje, N. F. (2002). Decomposing biological motion: A framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of Vision*, 2, 371–387.
- van der Linden, M. L., Kerr, A. M., Hazlewood, E. M., Hillman, S. J. & Robb, J. E. (2002). Kinematic and kinetic gait characteristics of normal children walking at a range of clinically relevant speeds. *Journal of Paediatric Orthopaedics*, 22, 800–806.

Dipl.-Psych. Andrej König

Fakultät für Psychologie
der Ruhr-Universität Bochum
AE Entwicklungspsychologie
Universitätsstraße 150
44780 Bochum