

Aus der Klinik für Neurologie
(Direktorin: Prof. Dr. med. Daniela Berg)
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Gangparameter und Oberkörperstabilität von älteren Menschen und
Parkinsonpatienten beim Überqueren von Hindernissen**

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Falko Peters
aus Bergisch Gladbach

Kiel, **2022**

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Walter Maetzler

2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. Thomas Pühler

Tag der mündlichen Prüfung: 22.01.2024

Zum Druck genehmigt, Kiel, den 09.11.2023

Gez.: Frau Prof. Dr. Janne Gierthmühlen

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

IV

1	EINLEITUNG	1
1.1	DAS IDIOPATHISCHE PARKINSONSYNDROM	1
1.1.1	EPIDEMIOLOGIE UND ÄTIOLOGIE	1
1.1.2	MOTORISCHE SYMPTOME	2
1.1.2.1	Brady-, Hypo- und Akinese	2
1.1.2.2	Tremor	3
1.1.2.3	Rigor	3
1.1.3	KÖRPERHALTUNG	4
1.1.4	POSTURALE INSTABILITÄT	5
1.1.5	GANGBILD	6
1.1.6	STÜRZE	7
1.1.6.1	Ursachen für Stürze	7
1.1.6.2	Gangbild und Stürze	8
1.1.7	NICHT-MOTORISCHE SYMPTOME	8
1.1.7.1	Kognitive Defizite	8
1.1.7.2	Neuropsychiatrische Symptome	9
1.1.7.3	Weitere nicht-motorische Symptome	10
1.1.8	AKTUELLE DIAGNOSTIK	10
1.1.9	THERAPEUTISCHES MANAGEMENT	11
1.2	GESUNDE, ÄLTERE MENSCHEN	12
1.2.1	MOTORISCHE DEFIZITE ÄLTERER MENSCHEN	12
1.2.2	GANGBILD ÄLTERER MENSCHEN	12
1.3	HINDERNISSE	13
1.3.1	HINDERNISÜBERWINDUNG	13
1.3.2	URSACHEN FÜR EINGESCHRÄNKTE HINDERNISÜBERWINDUNG	14
1.3.3	ALTE MENSCHEN: GEHEN ÜBER HINDERNISSE	15
1.3.4	IPS-PATIENTEN: GEHEN ÜBER HINDERNISSE	16
1.4	FRAGESTELLUNG UND HYPOTHESEN	17
2	MATERIAL UND METHODEN	18
2.1	STUDIENAUFBAU	18
2.1.1	ETHIK	18
2.1.2	STUDIENPOPULATION	18
2.1.2.1	Probandenkollektiv	18
2.1.2.2	Rekrutierung	19
2.1.2.3	Einschlusskriterien	19
2.1.2.4	Ausschlusskriterien	20
2.2	RÄUMLICHKEIT UND EQUIPMENT	20
2.3	UNTERSUCHUNGEN	22
2.3.1	STURZANAMNESE	23
2.3.2	MOVEMENT DISORDER SOCIETY-REVISED VERSION OF THE UNIFIED PARKINSON'S DISEASE RATING SCALE (MDS-UPDRS)	23
2.3.3	HOEHN & YAHR-STADIEN	23
2.3.4	MONTREAL COGNITIVE ASSESSMENT TEST (MOCA)	24

2.3.5	HINDERNISÜBERWINDUNG	24
2.4	DATENVERARBEITUNG UND STATISTISCHE AUSWERTUNG	28
3	ERGEBNISSE	30
3.1	DEMOGRAPHISCHE UND KLINISCHE DATEN	30
3.2	RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER UND OBERKÖRPERSTABILITÄT BEIM ÜBERWINDEN DES 10 CM HOHEN HINDERNISSES	32
3.2.1	RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER	32
3.2.2	OBERKÖRPERSTABILITÄT	33
3.3	RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER UND OBERKÖRPERSTABILITÄT BEIM ÜBERWINDEN DES 20 CM HOHEN HINDERNISSES	35
3.3.1	RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER	35
3.3.2	OBERKÖRPERSTABILITÄT	37
3.4	VERGLEICH DER ANPASSUNG RÄUMLICH-ZEITLICHER GANGPARAMETER UND DER OBERKÖRPERSTABILITÄT AN DIE ZUNAHME DER HINDERNISHÖHE	39
3.4.1	RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER	39
3.4.2	OBERKÖRPERSTABILITÄT	41
3.5	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN STURZANAMNESE UND GEMESSENEN PARAMETERN	42
4	DISKUSSION	45
4.1	EFFEKT DES HOHEN ALTERS UND DES IPS AUF RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER UND DIE OBERKÖRPERSTABILITÄT BEIM ÜBERWINDEN DES 10 CM HOHEN HINDERNISSES	46
4.1.1	HINDERNISFREIHEIT	46
4.1.2	HORIZONTALE FUß-HINDERNIS-DISTANZEN	50
4.1.3	SCHRITTBREITE	52
4.1.4	OBERKÖRPERSTABILITÄT	54
4.2	DER EFFEKT VON HOHEM ALTER UND IPS AUF RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER UND DIE OBERKÖRPERSTABILITÄT BEIM ÜBERWINDEN DES 20 CM HOHEN HINDERNISSES	57
4.2.1	RÄUMLICH-ZEITLICHE GANGPARAMETER	57
4.2.2	OBERKÖRPERSTABILITÄT	59
4.3	VERÄNDERUNGEN VON KLINISCHEN GANGPARAMETERN UND DER OBERKÖRPERSTABILITÄT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HINDERNISHÖHE	59
4.4	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN POSITIVER STURZANAMNESE UND RÄUMLICH-ZEITLICHEN GANGPARAMETERN	62
5	LIMITATIONEN	63
6	ZUSAMMENFASSUNG	64
	TABELLENVERZEICHNIS	66
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	67
	LITERATURVERZEICHNIS	69
	ANHANG	82
	ERKLÄRUNG ZUM EIGENANTEIL	84

DANKSAGUNG	85
------------	----

VERÖFFENTLICHUNGEN	86
--------------------	----

In der vorgelegten Arbeit sind alle personenbezogenen Bezeichnungen geschlechtsneutral zu verstehen. Ausschließlich zugunsten einer besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Schreibweisen verzichtet.

Abkürzungsverzeichnis

AE	alte Erwachsene
ANOVA	Analysis of variance
DAT	Dopamintransporter
FOG	Freezing of gait
hH	hohes Hindernis
IMU	Inertial Measurement Units
IPS	idiopathisches Parkinson-Syndrom
JE	junge Erwachsene
LF	leading foot
MDS	Movement Disorder Society
MoCA	Montreal Cognitive Assessment Score
nH	niedriges Hindernis
SARC-F	Strength, assistance with walking, rising from a chair, climbing stairs, and falls
SB	Schrittbreite
TF	trailing foot
TUG	Timed Up and Go
UKSH	Universitätsklinikum Schleswig-Holstein
UPDRS	Unified Parkinson's Disease Rating Scale
VOR	Vestibulo-okulärer Refle

1 Einleitung

1.1 Das idiopathische Parkinsonsyndrom

Im frühen 18. Jahrhundert (1817) veröffentlicht James Parkinson mit „An Essay on the Shaking Palsy“ erstmals eine detaillierte Beschreibung einer später nach ihm benannten Erkrankung [1]. Das Zittern der Hände, eine allgemeine Verlangsamung sowie ein kleinschrittiges Gangbild mit erhöhter Sturzneigung dokumentiert der britische Arzt allein durch Beobachtung von sechs Patienten. Damals vermutet Parkinson die zugrundeliegende Pathologie im oberen Halsmark. Später ist es Jean Martin Charcot, der weitere Beobachtungen hinzufügt und die Erkrankung „Maladie de Parkinson“ oder auch Morbus Parkinson nennt [2].

Differenziert werden symptomatische Formen mit zugrundeliegender Ätiologie, atypische Parkinsonsyndrome und genetische Varianten der Erkrankung. Geht die Erkrankung ohne erkennbare Ursache einher, spricht man vom idiopathischen Parkinsonsyndrom (IPS). Die folgende Arbeit bezieht sich ausschließlich auf die idiopathische Form.

1.1.1 Epidemiologie und Ätiologie

Im Zuge des demographischen Wandels der Gesellschaft mit stetigem Anstieg der Lebenserwartung gewinnen auch Erkrankungen des höheren Alters wie das IPS zunehmend an Bedeutung [3] [4]. Mit einer geschätzten Gesamtzahl von weltweit knapp 4.6 Millionen IPS-Patienten im Jahre 2005 [5] und aktuell etwa 250.000 bis 400.000 Erkrankten in Deutschland ist das IPS die häufigste neurodegenerative Bewegungsstörung weltweit. Es wird ein Anstieg um mehr als das Doppelte bis 2030 angenommen [5]. Neben zahlreichen Prädispositionen gilt das Alter als wichtigster Risikofaktor. So zeigt die Prävalenz pro 100 Einwohner eine lineare Korrelation zum Alter und steigt von 0.6% zwischen dem 65. und 69. Lebensjahr auf 3.5% im Alter von 85 bis 98 Jahren [6]. Ethnische und geographische Unterschiede sowie ortsabhängige Umwelteinflüsse und genetische Faktoren haben eine große Variabilität epidemiologischer Daten zur Folge. Die höchste Inzidenz liegt zwischen dem 70. und 79. Lebensjahr, das durchschnittliche Alter bei Symptombeginn um das 60. Lebensjahr [7]. Ein manifestes IPS vor dem 40. Lebensjahr ist selten und erhöht die Wahrscheinlichkeit für eine zugrundeliegende genetische Ätiologie [8] [9]. Zahlreiche Studien berichten über ein erhöhtes Risiko sowie eine frühere Krankheitsmanifestation beim männlichen Geschlecht [7]. Die Zahl

von Erkrankten, und damit die Bedeutung des IPS wird durch die steigende Lebenserwartung weiter zunehmen und das Gesundheitssystem vor große Herausforderungen stellen [5].

1.1.2 Motorische Symptome

Klinisch imponiert das IPS durch ein komplexes Zusammenspiel aus motorischen und nicht-motorischen Symptomen sowie krankheitsspezifischen und medikamenteninduzierten Merkmalen. Die Ausprägung der Symptomatik und die Entwicklung der Erkrankung sind sehr individuell und sorgen für eine erhebliche phänotypische Heterogenität. Die Symptome beginnen typischerweise fokal, vorzugsweise an den oberen Extremitäten und breiten sich im Verlauf der Erkrankung auf weitere Körpersegmente aus [10]. Das asymmetrische Ausprägungsmuster bleibt in der Regel über den gesamten Verlauf vorhanden, sodass der geschulte Untersucher auch nach vielen Jahren noch den Beginn der Symptomatik lokalisieren oder zumindest vermuten kann [11].

1.1.2.1 Brady-, Hypo- und Akinese

Als obligates Diagnosekriterium [12] ist die Bradykinese das Leitsymptom des IPS und beschreibt eine verlangsamte Initiierung und Ausführung repetitiver willkürlicher Bewegungen. Unter Akinese oder Hypokinese versteht man nach gängiger Literatur meist die Reduktion der Bewegungsamplitude bei nicht-repetitiven Bewegungen, also die generelle Verlangsamung [13]. In der klinischen Untersuchung auf Bradykinesiezeichen werden alternierende Bewegungen wie das schnelle Zusammenführen von Daumen und Zeigefinger (Fingertapping) oder schnelle Pro- und Supinationsbewegungen des Unterarms durchgeführt [14]. Akinese und Hypokinese machen sich z.B. durch ein kleines Schriftbild (Mikrographie), einen emotionslosen Gesichtsausdruck (Hypomimie) sowie eine leise, monotone Stimme bemerkbar. Der langsame Gang mit reduzierter Schrittlänge ist ebenfalls eine Folge der Hypokinese [15] [16].

Weiterhin beeinflusst das IPS die Gleichgewichtskontrolle. Die Einschränkungen von Gangbild und Gleichgewichtskontrolle beim IPS stehen im Fokus dieser Arbeit und werden im Folgenden näher erläutert. Letztlich haben die Verlangsamungen der Bewegungen negative Auswirkungen auf Mobilität, soziale Unabhängigkeit und Lebensqualität der Betroffenen [13].

1.1.2.2 Tremor

Das charakteristische Zittern ist einfach zu diagnostizieren und betrifft im Laufe der Erkrankung viele IPS-Patienten [17]. Der Tremor entsteht durch streng rhythmische, oszillatorische Kontraktionen antagonistischer Muskelgruppen [13]. Typisch ist ein Ruhetremor der oberen Extremitäten mit 4 bis 6 Hertz und distaler Prädominanz [14]. Nicht selten koexistieren jedoch auch weitere Formen wie Aktions- und Haltetremor [18]. Die rapiden Pro- und Supinationsbewegungen der Hand unter Miteinbezug des Daumens werden auch als „Münzenzähler-Tremor“ bezeichnet [17]. Kognitive Anstrengung und psychische Belastung erhöhen die Amplitude und können klinisch zur Demaskierung verwendet werden [11]. Während willkürlicher Bewegungen der betroffenen Extremität und im Schlaf hingegen sistiert der Tremor typischerweise [14].

1.1.2.3 Rigor

Der Rigor beschreibt einen „wachsartigen“ erhöhten Muskeltonus und äußert sich in einem erhöhten Widerstand gegen passiv von extern ausgeführten, langsamen Bewegungen [19]. Durch den erhöhten Tonus antagonistischer Muskelgruppen bemerkt der Untersucher ein Steifigkeitsgefühl über die gesamte Bewegungsstrecke hinweg, unabhängig von Geschwindigkeit und Richtung der Ausführung [20]. Insbesondere an den distalen Extremitäten ist der Rigor für das sogenannte Zahnradphänomen verantwortlich. Es zeigt sich ein ruckartiges Nachgeben der Muskulatur anstelle einer flüssigen Bewegung [21]. Klinisch sind die Patienten oft von Schmerzen geplagt, wobei insbesondere Schulter- und Rückenschmerzen nicht selten das erste Anzeichen des IPS darstellen und als Arthritis, rheumatische Erkrankungen oder Bandscheibenschäden fehlinterpretiert werden [20].

Der Rigor von distalen Extremitäten und axialer Muskulatur (Rumpf, Nacken) hat einen relevanten Einfluss auf die funktionelle Mobilität und das Gangbild der Patienten [19]. Die eingeschränkte Fähigkeit zur Extension der Hüftmuskulatur und eine verminderte Plantarflexion des Sprunggelenks tragen wesentlich zum langsamen, kleinschrittigen Gangmuster bei [16]. Des Weiteren provoziert der Rigor ein reduziertes Mitschwingen der Arme mit negativem Einfluss auf die dynamische Fortbewegung [22]. Die Rigidität der Rumpfmuskulatur erhöht im Stehen die Stabilität der Patienten, reduziert jedoch funktionelle Mobilität, Flexibilität und dynamische Gleichgewichtskontrolle [21] [23].

Drehungen und Richtungsänderungen sind wesentlicher Bestandteil des täglichen Lebens. Aufgrund des Hypertonus der axialen Muskulatur zeigt sich beim IPS-Patienten eine simultane Rotation von Kopf, Schultern und Hüfte. Das Resultat ist eine langsame Wendung mit erhöhter Schrittzahl, kompensatorisch erhöhter Schrittbreite und Sturzneigung [24] [25].

Die geringe Korrelation zwischen der Ausprägung des Rigors und dem Mangel an Dopamin erschwert das Verständnis zugrundeliegender Mechanismen. Vermutet wird die Beteiligung zahlreicher subkortikaler und kortikaler Strukturen und Netzwerke. Baradaran et al. [20] konnten eine negative Korrelation zwischen dem Rigor und der Kommunikation zwischen Putamen und präfrontalem supplementärmotorischen Kortex nachweisen. Das sogenannte Froment-Manöver beschreibt die Verstärkung des Rigors bei Durchführung simultaner Willkürbewegungen der kontralateralen Extremität. Sie dient dem Untersucher zur Demaskierung eines latenten Rigors [14].

1.1.3 Körperhaltung

Die Stabilisierung einer aufrechten Körperhaltung unter dem Einfluss von Schwerkraft und Umweltfaktoren erfordert die Integration und Verarbeitung von visuellen, vestibulären und propriozeptiven Afferenzen durch das Nervensystem [26]. Einschränkungen auf verschiedenen Ebenen dieser Regulation haben beim IPS eine abnorme Körperhaltung zur Folge. Typisch ist eine Beugung der großen Gelenke mit resultierendem, vornübergebeugtem Oberkörper und gebückten Schultern. Durch eine Flexion im Nacken kann zusätzlich die uneingeschränkte Sicht nach vorne aufgehoben sein [27]. Die Prädiktoren der Haltungsanomalie sind multifaktoriell und bis heute nicht eindeutig geklärt. Unter den motorischen Symptomen scheint insbesondere der Rigor der axialen Körpersegmente ursächlich zu sein. Unter den nicht-motorischen Manifestationen des IPS zeigen sich Defizite von spinaler Propriozeption und Kognition, aber auch Depressionen und Fatigue als kausale Faktoren. Weiterhin kann bereits ein Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der gebückten Haltung und dem Schweregrad der Erkrankung gezeigt werden [28]. Die starke Beugung der großen Gelenke geht mit Einschränkungen der Gleichgewichtskontrolle [29] und des Gangbildes [28] einher. Ein erhöhtes Sturzrisiko und negative Auswirkungen auf die Lungenfunktion mit letztlich reduzierter Lebensqualität [30] und erhöhter Mortalität können resultieren [28]. Ein Teil der Betroffenen leidet zusätzlich an stärkeren Formen der Haltungsanomalien, die motorische Einschränkungen mit sich bringen und therapeutisch nur schwer zugänglich sind. Dazu zählen die Kamptokormie, das Pisa-Syndrom, der Antecollis und die Skoliose. Eine der schwerwiegendsten Haltungsanomalien des IPS ist die Kamptokormie. Sie beschreibt eine ungewollte, ausgeprägte Beugung der thorakolumbalen

Wirbelsäule, die sich im Stehen zeigt, im Gehen zunimmt und im Liegen typischerweise sistiert [31]. Laut epidemiologischer Daten manifestiert sich die Anomalie bei 3 - 17% der IPS-Patienten. Sie ist mit einem höheren Lebensalter und fortgeschrittenem IPS assoziiert und tritt durchschnittlich 7-8 Jahre nach Symptombeginn auf. Für die Diagnose werden das Ausmaß der Vorwärtsbeugung sowie Aspekte wie Reversibilität, koexistente Rückenschmerzen und Verhärtung der paraspinalen Muskulatur berücksichtigt [32]. Die Auswirkungen auf Gesundheit und Funktionalität im Alltag der Betroffenen sind erheblich. So kann die eingeschränkte Sicht nach vorne mit Einfluss auf das Gangbild auftreten. Zum Teil zeigt sich eine kompensatorische Hyperextension der Nackenmuskulatur [27]. Es gibt Hinweise, dass die Kamptokormie zumindest im akuten Stadium auf die tiefe Hirnstimulation anspricht [33].

1.1.4 Posturale Instabilität

Posturale Stabilität beschreibt die Fähigkeit, den Körperschwerpunkt („center of mass“) sowohl unter statischen, als auch unter dynamischen Bedingungen innerhalb der Unterstützungsfläche („base of support“) koordinieren zu können [34]. Im Rahmen der posturalen Instabilität beim IPS kann die stabile Körperhaltung aufgrund von gestörten Reflexen nicht adäquat beibehalten oder verändert werden, ohne die aufrechte Körperposition zu verlieren. Die pathophysiologischen Mechanismen sind komplex und noch unzureichend verstanden. Ein Mangel an cholinergem Neurotransmission, axiale Steifigkeit, vermehrte Schwankungen des Oberkörpers und ein gestörter Muskeltonus werden als mögliche Ursachen diskutiert [35]. Insbesondere in fortgeschrittenen Stadien zählt sie zu den häufigsten Symptomen des IPS. In einer multizentrischen Studie von Hely et al. zeigen 34% der IPS-Patienten drei Jahre nach Krankheitsbeginn Einschränkungen der posturalen Kontrolle. In einer 15 Jahre später erfolgten Nachuntersuchung berichten bereits 92% der Teilnehmer unter einer reduzierten Gleichgewichtskontrolle zu leiden [36] [37]. Möglicherweise zeigen sich leichte Einschränkungen der Gleichgewichtskontrolle sogar schon in der prodromalen Phase der Erkrankung [38]. Eine ausgeprägte Manifestation bereits in frühen Stadien muss allerdings an die Diagnose eines atypischen Parkinsonsyndroms denken lassen [35]. Klinisch führt das Symptom zu einer starken Behinderung und potentiell zum Verlust der funktionellen Unabhängigkeit. Alltägliche Aktivitäten wie Körperdrehungen, der Wechsel vom Sitzen zum Stehen oder das Gehen über banale Hindernisse werden zu Herausforderungen [39]. Die posturale Instabilität gilt als unabhängiger Risikofaktor für das vermehrte Auftreten von Stürzen [40] und ist mit einer verstärkten Angst vor Stürzen assoziiert [41]. Zur Diagnose wird häufig der Pull-Test durchgeführt. Dabei wird der Patient an den Schultern nach hinten gezogen und die Ausweichbewegungen evaluiert. Aufgrund der Subjektivität in der Beurteilung und der

variablen Durchführung hinsichtlich Kraftaufwand und Anweisungen an den Patienten wird die Aussagekraft des Pull-Tests zunehmend in Frage gestellt [42] [43] [44]. Die posturale Instabilität zeigt häufig ein unzureichendes Ansprechen auf die Antiparkinsontherapie. Aufgrund der häufig beobachteten Therapieresistenz werden Defekte anderer Transmittersysteme als Ursache vermutet. Es besteht auch zunehmend Evidenz, dass die konsequente Durchführung von Gleichgewichtsübungen eine Verbesserung bringen kann [34].

1.1.5 Gangbild

Wie bereits erwähnt, betrifft die Gangstörung nahezu alle IPS-Patienten bereits in frühen Stadien und geht häufig mit schwerwiegenden Folgen einher [15]. Klinisch präsentiert sich der Parkinsongang typischerweise kleinschrittig und schlurfend [45]. Die reduzierte Ganggeschwindigkeit als Folge der Bewegungsarmut resultiert primär aus einer Abnahme der Schrittlänge. Die Schrittfrequenz (Kadenz) scheint beim IPS weniger verändert zu sein. Manche Patienten versuchen jedoch die Frequenz zu erhöhen, um die abnehmende Schrittlänge zu kompensieren [46] [47]. Eine weitere Folge der Bewegungsarmut sind Auffälligkeiten beim Anheben des Fußes. Es besteht Evidenz, dass IPS-Patienten eine reduzierte Fußfreiheit (Distanz zwischen Fuß und Boden in der Schwungphase des Gangzyklus) aufweisen. Das Verhalten erhöht das Risiko für einen unerwarteten Bodenkontakt mit möglicher Sturzfolge [48]. Als Doppelstandphase („double limb support“) wird im Gangzyklus der Moment bezeichnet, in dem beide Füße auf dem Boden stehen bzw. Bodenkontakt haben. In der humanen Lokomotion macht dieser Anteil knapp 20% des Schrittzklus aus. Beim IPS ist diese Phase typischerweise verlängert. Vermutet wird ein Kompensationsmechanismus zur Reduktion der defizienten Körperstabilität [15]. Der oft asymmetrische und generell verminderte Armschwung trägt vermutlich ebenfalls zur Gangunsicherheit bei und ist bereits in frühen Stadien erkennbar [22] [45]. Zudem besteht Evidenz, dass (zumindest manche) IPS-Patienten verstärkt auf den Fußballen und weniger auf den Fersen gehen, ihr Körperschwerpunkt dadurch vor verlagert wird und sie einen atypischen Gangzyklus annehmen, der die Gleichgewichtskontrolle zusätzlich erschwert [49]. Insbesondere Patienten mit Freezing of gait (FOG) scheinen dieses Verhalten zu zeigen [50]. Der Gang beim typischen IPS-Patienten ist gekennzeichnet durch reduzierte Automtizität, mangelnde Rythmizität und verstärkte Variabilität der Gangparameter [51]. Es besteht wachsende Evidenz, dass eine ausgeprägte Schritt-zu-Schritt-Variabilität direkt mit einem erhöhten Sturzrisiko assoziiert ist [52] [53]. In fortgeschrittenen Stadien können IPS-Patienten ihr Körpergleichgewicht im Gehen oft nicht mehr ausreichend kontrollieren, sie versuchen ihre

Schrittfrequenz zu erhöhen und bewegen ihre Beine dem Körperschwerpunkt hinterher. Bei diesem als Festination bezeichneten Phänomen können die Patienten letztlich nicht mehr anhalten und stürzen gehäuft nach vorne. Zudem zeigen sich Phasen kompletter Bewegungslosigkeit. Initiierung von Bewegungen fallen schwer und die Patienten bleiben insbesondere in engen Umgebungen, in gesellschaftlichen Situationen [54] oder vor Hindernissen stehen. Hier spricht man von Gangfreezing (Freezing of Gait, FOG) [55]. Das Einfrieren der Bewegungen kann wenige Sekunden bis mehrere Minuten dauern, manifestiert sich oft unerwartet und kann situationsbedingt, z.B. beim Überqueren einer Straße, schwerwiegende Folgen haben [56].

1.1.6 Stürze

Stürze ereignen sich bereits in frühen IPS-Stadien, auch bei optimaler medikamentöser Einstellung [57] und manifestieren sich häufig bei alltäglichen Aktivitäten wie Richtungsänderungen und Überqueren von Hindernissen [58]. Jedes Jahr stürzen zwischen 38% [59] und 68% [60] [61] der IPS-Patienten und knapp 35% erleiden dabei eine Fraktur [62]. Sturzbedingte Verletzungen sind die häufigste Ursache für Hospitalisierung beim IPS [63]. Unter anderem können intrakranielle Blutungen lebensbedrohliche Komplikationen darstellen [64] [65]. Die Zunahme von Hospitalisierungen [66] und vermehrten Einweisungen in Pflegeheime haben zudem eine starke Belastung des Gesundheitssystems zur Folge [67].

1.1.6.1 Ursachen für Stürze

Das gehäufte Auftreten von Verletzungen im Rahmen von Stürzen bei IPS-Patienten erklärt man sich, zumindest zum Teil, durch reduzierte bzw. verlangsamte Schutzreflexe, die z.B. durch eine verlangsamte Suppression des vestibulo-okulären Reflexes (VOR) bedingt sein können [68]. So gilt das IPS als unabhängiger Risikofaktor einer erhöhten Mortalität bei Hüftfrakturen [69], unter der Annahme dass bei Stürzen diese auch schwerer verlaufen, als bei nicht-IPS Personen. Dauer und Schweregrad der Erkrankung, FOG, axiale Haltungsstörung, visuelle und kognitive Defizite sowie eine Antiparkinsonmedikation zählen zu den wesentlichen Risikofaktoren [70]. Eine weitere Gefahr stellt die Sturzangst dar [71]. Aus Angst vor weiteren Stürzen reduzieren IPS-Patienten oft ihre Mobilität und ziehen sich z.B. aus dem sozialen Leben zurück. Dies führt zu einer Verstärkung der Immobilität und es kommt zu einem Teufelskreis mit einer Zunahme funktioneller Behinderung und Gebrechlichkeit [72]

[71]. Mangelnde Bewegung und körperliche Inaktivität erhöhen letztlich das Risiko für Osteoporose und kardiovaskuläre Erkrankungen mit reduzierter Lebenserwartung [73].

1.1.6.2 Gangbild und Stürze

Das Gehen mit langsamen, kleinen Schritten beim IPS ist nachweislich mit einem erhöhten Sturzrisiko assoziiert [74]. Die schmale Basis im Gang der Patienten reduziert die Unterstützungsfläche und erschwert die Kontrolle des Körperschwerpunkts. Verstärkte Rumpfschwankungen zeigen sich insbesondere in der mediolateralen Ebene, korrelieren mit dem Schweregrad der Erkrankung und sind für die Evaluierung der Gleichgewichtskontrolle von großer Bedeutung [70] [75].

1.1.7 Nicht-motorische Symptome

Die nicht-motorischen Symptome tragen zur Heterogenität des Krankheitsbildes bei, treten bis zu 20 Jahre vor Diagnosestellung auf [76] [38] und haben, wie oben schon erwähnt, auch einen bedeutenden Einfluss auf Lebensqualität und Lebenserwartung beim IPS [77]. Ätiologisch spielt die Ausbreitung der Lewy-Pathologie unter anderem auf Neokortex, autonomes Nervensystem und limbische Hirnareale eine Rolle [78].

1.1.7.1 Kognitive Defizite

Das kognitive Profil von IPS-Patienten ist häufig auf verschiedenen Ebenen eingeschränkt, wobei die Erkrankung auch hier einen heterogenen Charakter zeigt [79]. Foltynie et al. [80] berichten eine Prävalenz kognitiver Einschränkungen bei 36% in einer Kohorte neu diagnostizierter IPS-Patienten. Im Vergleich zur gesunden Bevölkerung besteht ein 6-fach erhöhtes Risiko an einer Demenz zu erkranken [81] [82]. Betroffen sind insbesondere exekutive Funktionen, Aufmerksamkeit und visuell-räumliche Fähigkeiten [83] [84]. Einschränkungen der kognitiven Leistungsfähigkeit erhöhen das Sturzrisiko und sind mit einer erhöhten Mortalität assoziiert [85]. In der Pathogenese scheint der Dopaminmangel sowie die Affektion fronto-striataler (auch nicht-dopaminerg, wie z.B. der cholinergen) Bahnen eine Rolle zu spielen [86].

Es zeigen sich relevante Korrelationen zwischen bestimmten kognitiven Aspekten und dem Ausmaß der Gangstörung [87]. In Untersuchungen von Kueper et al. [88] findet sich ein erhöhtes Risiko für fortschreitende kognitive Einschränkungen bei verringerter Ganggeschwindigkeit. Eine Querschnittsstudie aus dem Jahr 2019 berichtet über die Bedeutung von kognitiver Flexibilität für die Gleichgewichtsregulierung [89]. Der Zusammenhang zwischen Kognition und Motorik kann gut anhand von Dual-Tasking Aufgaben dargestellt werden. IPS-Patienten priorisieren bei der gleichzeitigen Durchführung verschiedener Aufgaben die Motorik und zeigen dadurch signifikante Defizite in kognitiven Fähigkeiten [90]. Das Überqueren von Hindernissen geht mit einer Aktivierung des präfrontalen Kortex einher [91], sodass kognitive Defizite bei der Beurteilung des Sturzrisikos beim IPS eine entscheidende Rolle spielen könnten.

1.1.7.2 Neuropsychiatrische Symptome

Neuropsychiatrische Symptome wie Depressionen, Angst und Apathie sind häufige Manifestationen beim IPS [92]. Die klinische Differenzierung zwischen stimmungsinduzierten Symptomen und IPS-spezifischen Merkmalen wie z.B. die Ganghypokinese oder ein emotionsloser Gesichtsausdruck (Maskengesicht) ist oft schwierig [93]. Das Auftreten klinisch relevanter, depressiver Veränderungen wird auf 35% geschätzt [94]. Affektive Störungen haben einen bedeutenden Einfluss auf die Prognose der Betroffenen und sind häufig unzureichend therapiert [95] [96]. Zudem hat die emotionale Verfassung signifikante Auswirkungen auf den funktionellen Gesundheitszustand und die motorischen Fähigkeiten. Avanzino et al. [97] beschreiben einen Zusammenhang zwischen affektiven Funktionsstörungen und der Lokomotion beim IPS. Ebenfalls wird gezeigt, dass eine gebückte Haltung, assoziiert mit depressiver Verstimmung, zu einer vornübergebeugten Rumpfhaltung und damit zu einer erhöhten Instabilität der Patienten führt [98].

Panikattacken, generalisierte Angststörung und soziale Phobien sind weitere, häufige nicht-motorische Manifestationen des IPS. Wie zuvor beschrieben, hat die Angst vor Stürzen negative Auswirkungen auf Mobilität und Gangbild [93] [99].

Bis zu 40% der IPS Patienten leiden an einer manifesten Apathie [100]. Dadurch geförderte soziale Isolierung und progrediente körperliche Inaktivität führen zu funktioneller Schwäche mit Beeinträchtigung von Mobilität und Motorik [101]. Es besteht zunehmende Evidenz für einen direkten Zusammenhang zwischen Apathie, Motorik und Gleichgewichtskontrolle beim IPS [81] [100] [102].

1.1.7.3 Weitere nicht-motorische Symptome

Knapp die Hälfte aller IPS-Patienten leidet an einer übermäßigen Erschöpfung, die als Fatigue bezeichnet wird [103]. Sie zählt zu den häufigsten nicht-motorischen Symptomen und zeigt neben Schmerzen und Depressionen den stärksten negativen Einfluss auf die Lebensqualität der Betroffenen [104]. Eine Erschöpfung der unteren Extremität geht mit Einschränkungen des Gangbildes insbesondere bei erhöhten körperlichen Anforderungen wie dem Überqueren von Hindernissen einher [105]. Zudem dokumentieren Lindholm et al. [106] einen Zusammenhang zwischen Fatigue und vermehrter Angst vor Stürzen, die als unabhängiger Risikofaktor weiterer Stürze angesehen wird. Analysen von Nallegowda et al. [107] weisen eine Korrelation zwischen Muskelschwäche und Gangparametern sowie posturaler Instabilität nach.

Dysautonome Störungen äußern sich unter anderem durch orthostatische Hypotension, Blasenfunktionsstörungen, gastrointestinale Symptome und sexuelle Dysfunktion [104]. Die kardiovaskuläre autonome Neuropathie gilt als unabhängiger Risikofaktor für das Auftreten von Stürzen beim IPS [108] [109]. Aufgrund von Harnkontrollstörungen eilen die Patienten häufig zur Toilette und vernachlässigen insbesondere nachts eine sichere Bewegungsausführung, was wiederum das Risiko für Stürze erhöht [21].

Sensorische Symptome manifestieren sich als Schmerzen, Parästhesien oder Hyposmie [104]. Zudem werden bei IPS-Patienten propriozeptive Defizite nachgewiesen, die mit Einschränkungen der Haltungsstabilität assoziiert sind [107]. Weiterhin können sich variable Ausprägungen okulärer und visueller Dysfunktionen zeigen, die viele Jahre vor Diagnosestellung auftreten können. Der retinalen Ablagerung von alpha-Synuklein kommt eine besondere Bedeutung in der Frühdiagnostik als möglicher Biomarker zu [110]. Visuelle Defizite sind durch verschiedene Störfaktoren negativ mit motorischen Funktionen assoziiert [111]. Die präzise Einschätzung von Distanzen zwischen Fuß und Hindernis kann beeinträchtigt sein und zu Stürzen führen [112].

1.1.8 Aktuelle Diagnostik

Eine definitive Diagnosestellung des IPS ist ausschließlich durch eine postmortale Autopsie möglich [113]. Die Diagnose am „lebenden Patienten“ wird grundsätzlich klinisch gestellt [114]. Grundlage sind eine sorgfältige Anamnese sowie eine ausführliche neurologische Untersuchung mit Beurteilung von Motorik und Gangbild. Basierend auf den Kriterien der Movement Disorder Society (MDS) wird die Diagnose des IPS gestellt, wenn neben der

Bradykinese mindestens eines der weiteren Kardinalsymptome Tremor oder Rigor vorliegt. Klinisch manifeste Defizite der posturalen Stabilität werden in frühen Stadien nicht mehr als Kardinalkriterium berücksichtigt. Pyramidale oder zerebelläre Symptome, okulogyre Krisen, eine diagnostizierte Enzephalitis in der Anamnese und ausgeprägte autonome Dysfunktionen stellen „red flags“ bei der IPS Diagnose dar [115]. Ein unilateraler Beginn mit persistierender Asymmetrie im Krankheitsverlauf, eine langsame Progression und das exzellente Ansprechen auf eine L-Dopa Therapie gelten als die Diagnose unterstützende (supportive) Kriterien [114]. Fakultative Testverfahren dienen dem Ausschluss von Differenzialdiagnosen und können den Verdacht auf ein IPS erhärten. Als diagnosis ex juvantibus dient die Gabe von L-Dopa oder alternativ die subkutane Applikation von Apomorphin. Das prompte Ansprechen der motorischen Symptome erhöht die Wahrscheinlichkeit für ein IPS [116]. Mittels funktioneller Bildgebung (SPECT/PET) kann eine Dichteabnahme von Dopamintransportern (DAT) als Korrelat des striatalen Dopaminverlusts nachgewiesen werden [117], welche typischerweise seitenbetont (kontralateral zur mehr betroffenen Seite) auftritt [118]. In der Hirnparenchymsonographie kann häufig eine Hyperechogenität im Bereich der Substantia nigra festgestellt werden [119]. Sowohl MRT- als auch CT-Routineaufnahmen sind beim IPS nicht richtungsweisend, ermöglichen allerdings den Ausschluss von Differenzialdiagnosen [120].

1.1.9 Therapeutisches Management

Die Therapie des IPS erfolgt hauptsächlich symptomatisch [121]. Goldstandard ist der Ersatz des Dopamins mithilfe von L-Dopa. Weitere Medikamente wie Dopaminagonisten, MAO-Inhibitoren und COMT-Hemmer werden abhängig von individuellen Bedürfnissen eingesetzt [122]. Während die motorischen Kardinalsymptome schnell und gut durch die Pharmakotherapie kontrolliert werden können, sprechen nicht-motorische Symptome häufig nur unzureichend an. Zum Teil werden sogar negative Effekte auf diese Symptome beobachtet [123] [124]. Der dopaminerge Einfluss auf Gangbild und Gleichgewichtskontrolle ist noch unzureichend verstanden. Es zeigt sich jedoch zum Teil eine Zunahme der posturalen Schwankungen bei IPS-Patienten in fortgeschrittenen Stadien nach Einnahme von L-Dopa [125]. Eine bestmögliche Kontrolle der Symptomatik erfordert ein multidisziplinäres Zusammenspiel aus pharmakologischen und nicht-pharmakologischen Maßnahmen. Daher sollte jeder IPS-Patient mithilfe von konservativen Bewegungstherapien unterstützt werden. Es besteht wachsende Evidenz, dass regelmäßige Physiotherapie und weitere Therapieformen zur Verbesserung von Alltagsfähigkeiten (z.B. Ergotherapie) einen positiven Einfluss auf Gangbild, Gleichgewicht und Sturzrate haben [126] [127]. Als invasives Verfahren

ist die stereotaktische Hirnstimulation eine weitere Therapieoption des IPS. Das Verfahren kommt nach Versagen aller Therapieoptionen und unter Berücksichtigung der Kontraindikationen wie kognitiver Defizite und schwerer Systemerkrankungen zum Einsatz [128] [129].

1.2 Gesunde, ältere Menschen

1.2.1 Motorische Defizite älterer Menschen

Das Alter gilt als stärkster Risikofaktor für Gangstörungen [130]. Die Prävalenz motorischer Defizite steigt von 10% im Alter von 60 bis 69 Jahren auf über 60% ab dem 80. Lebensjahr [131]. Mit zunehmendem Alter steigt zudem das Risiko einer multifaktoriellen Genese durch Koexistenz verschiedener Krankheitsbilder. Polyneuropathie mit Einschränkung sensorischer Wahrnehmung und vaskulär bedingte Enzephalopathie (Subkortikale arteriosklerotische Enzephalopathie, SAE) mit frontaler Gangstörung („higher level gait disorder“ [132]) zählen zu den häufigen Ursachen von Gangstörungen [133]. Des Weiteren haben auch nicht-vaskulär bedingte kognitive Defizite inklusive dementieller Erkrankungen im hohen Alter einen wesentlichen Anteil an den lokomotorischen Beeinträchtigungen [134]. Die altersbedingten Einschränkungen visueller und akustischer Fähigkeiten sowie eine progrediente Abnahme der Muskelkraft reduzieren die motorischen Kapazitäten und beeinflussen indirekt die Gangfähigkeit [135]. Folge sind rezidivierende Stürze mit zum Teil schwerwiegenden Verletzungen und Verlust der Unabhängigkeit, eine erhebliche Beeinträchtigung der Lebensqualität sowie eine Zunahme von Hospitalisierung und Mortalität [136] [137] [138].

1.2.2 Gangbild älterer Menschen

Die präzise Beobachtung des Gangbildes kann relevante Informationen über neurodegenerative sowie kardiovaskuläre Erkrankungen, psychische Verfassung, funktionellen Gesundheitszustand und Lebenserwartung liefern [133]. So kann gezeigt werden, dass die Ganggeschwindigkeit bezüglich des Risikos an einer Demenz zu erkranken eine höhere Sensitivität als das Vorliegen von kognitiven Defiziten per se aufweist [139] [140]. Das genaue Verständnis für den Zusammenhang zwischen spezifischen Gangparametern und zugrundeliegenden Mechanismen ist daher von entscheidender Bedeutung [141]. Die Zunahme des Lebensalters geht mit charakteristischen Gangveränderungen einher. Neben einer Abnahme von Geschwindigkeit, Schrittlänge und Schrittfrequenz kommt es zu einer

verlängerten Doppelstandphase und einem unzureichenden Anheben der Füße mit erhöhtem Risiko zu stolpern [142] [143]. Typisch ist auch ein breitbasiges Gangmuster [144] sowie eine Abnahme des Armschwungs [145]. Zur Kompensation einer verminderten Gleichgewichtskontrolle versuchen ältere Menschen die Einzelstandphase proportional zum Gangzyklus zu verringern und mehr Zeit in der wesentlich stabileren Doppelstandphase zu verbringen [146]. Dieser Mechanismus wird insbesondere bei der Überwindung von Hindernissen verdeutlicht, da in dieser Situation die Einzelstandphase linear mit Zunahme der Hindernishöhe ansteigt und eine höhere posturale Koordinationsfähigkeit erfordert [147]. Weiterhin ist die Variabilität der Schritte ein wichtiger und sensibler Parameter zur Identifizierung altersbedingter Veränderungen und eines erhöhten Sturzrisikos. Der Gang des älteren Menschen zeigt Untersuchungen zur Folge eine erhöhte Variabilität [148].

1.3 Hindernisse

Im täglichen Leben ist der Mensch zahlreichen Hindernissen ausgesetzt, die zur sicheren Überwindung eine adäquate Anpassung von Motorik und Gleichgewicht erfordern [149].

1.3.1 Hindernisüberwindung

Die folgende Grafik (Abbildung 1) zeigt den typischen Ablauf der Beinbewegungen beim Überqueren eines Hindernisses während des Gehens.

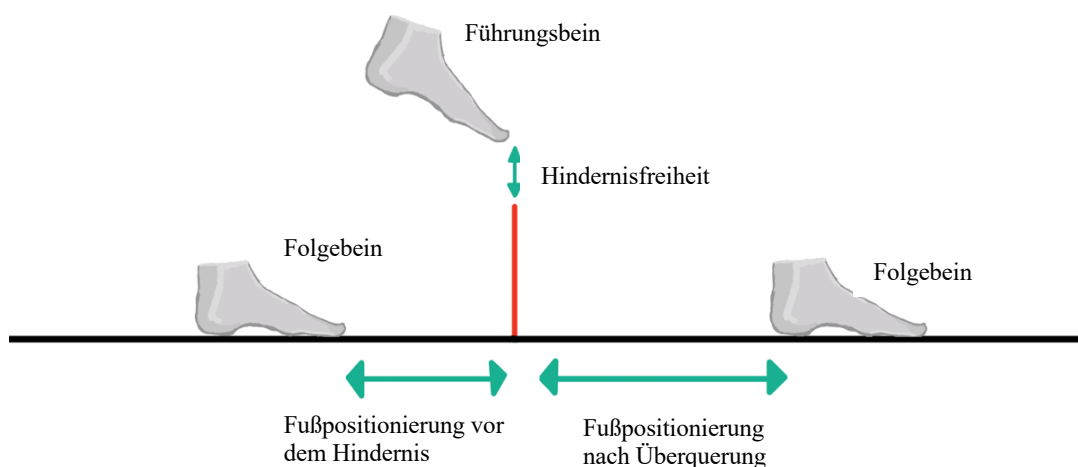


Abbildung 1: Gangzyklus beim Gehen über Hindernisse.

Für ein sicheres Überwinden wird zuerst das Führungsbein (leading limb) und anschließend das Folgebein (trailing limb) über das Hindernis befördert [151]. In den meisten Fällen wird das stärkere Bein als Führungsbein verwendet, wobei sich diese Selektion mit Zunahme der Hindernishöhe noch verstärkt [150] [151]. Wie im normalen Gangzyklus können eine Schwung- und eine Standphase unterschieden werden. Die Schwungphase bezeichnet die Zeit ab dem Verlassen des Fußes vom Boden bis zum erneuten Bodenkontakt [152].

Während in der stabilen Doppelstandphase beide Füße fest auf dem Boden stehen, wird das Gleichgewicht der Körpermasse in der Einzelstandphase von nur einem Bein koordiniert. Die Einzelstandphase ist beim Gehen über Hindernisse im Vergleich zum normalen Gangzyklus verlängert und erfordert eine erhöhte Kraft insbesondere der Hüftmuskulatur, um das Hindernis sicher zu überwinden und den Körperschwerpunkt innerhalb der Unterstützungsfläche zu kontrollieren [153]. Die Hindernisfreiheit beschreibt den geringsten vertikalen Abstand zwischen Fuß und Hindernis in der Schwungphase [154]. In der horizontalen Ebene unterscheidet man die Zehenspitzenfreiheit vor dem Hindernis und die Fersenfrieheit hinter dem Hindernis. Im Vergleich zum Führungsbein ist die Sicht auf den Bewegungsablauf des Folgebeins in der Schwungphase versperrt. Daher zeigt sich in dieser Phase in der Regel eine kleinere Hindernisfreiheit [155].

1.3.2 Ursachen für eingeschränkte Hindernisüberwindung

Das Überqueren von Hindernissen ist eine komplexe Aufgabe, bei der eine adäquate Gleichgewichtskontrolle sowie die präzise Positionierung der Füße für ein sicheres Verhalten notwendig sind. Daher erhöhen motorische Defizite bei der Überwindung von Hindernissen durch verschiedenen Mechanismen das Sturzrisiko [156]. Einschränkungen der visuellen Kontrolle durch reduzierte Sehkraft oder Sichtbehinderung erschweren präzise Bewegungen und steigern die Häufigkeit von Hinderniskontakten [157]. Defizite kognitiver Fähigkeiten haben ebenfalls negative Effekte auf die sichere Hindernisüberwindung. Menschen mit Alzheimer-Krankheit berühren Hindernisse häufiger als gesunde Menschen im höheren Lebensalter [158]. Aufgrund der Affektion verschiedener Körperfunktionen wird das Verhalten auch durch die Einnahme von Medikamenten beeinflusst [159]. Mit zunehmendem Alter kommt es häufiger zu einer Sturzangst, die sich insbesondere bei Menschen mit bereits erlebten Stürzen zeigt. Studien zeigen einen negativen Einfluss dieses psychischen Faktors auf die sichere Überquerung von Hindernissen [160]. Weitere, bereits nachgewiesene Ursachen einer eingeschränkten Hindernisüberwindung sind eine hohe Gangvariabilität [161] sowie Einschränkungen der Gleichgewichtskontrolle [162]. Zudem besteht Evidenz, dass kurze Schritte vor dem Hindernis [163] und eine langsame Ganggeschwindigkeit [152] mit

einem erhöhten Sturzrisiko einhergehen. Sowohl bei Menschen im höheren Lebensalter, als auch bei IPS-Patienten gelten Hindernisse als eine der häufigsten Ursachen von Stürzen mit teilweise gravierenden Folgen [164] [165]. Es wird daher im Folgenden der Effekt des Alterungsprozesses generell, und des IPS im Speziellen, auf das Verhalten beim Gehen über Hindernisse näher beschrieben.

1.3.3 Alte Menschen: Gehen über Hindernisse

Bis zu 60% der Stürze älterer Menschen ereignen sich durch das Stolpern über Hindernisse [166]. Mit zunehmendem Alter kommt es zu Einschränkungen von Muskelkraft, propriozeptiver Wahrnehmung, Sehfähigkeit und Frontalhirn-assoziierten Funktionen [135] [167]. Um diesen Defiziten entgegenzuwirken und Hindernisse sicher zu überwinden, scheinen ältere Menschen zum Teil aktive Strategien anzuwenden. Diese spiegeln sich in klinischen Gangparametern wider und sind von diagnostischer und therapeutischer Bedeutung [168]. Im Vergleich zu gesunden, jungen Menschen gehen ältere Menschen langsamer mit kleineren Schritten über Hindernisse und benötigen insgesamt mehr Zeit für die Überwindungen [160]. Diese Veränderungen werden mit zunehmender Hindernisgröße noch deutlicher sichtbar [164]. Für die Veränderung der Hindernisfreiheit gibt es bislang keine einheitlichen Daten. Diese wird als reduziert [169], unverändert [167] und erhöht [164] beschrieben. Durch Muskelschwäche [170] sowie Abnahme kognitiver und exekutiver Funktionen [171] im Alter sind Veränderungen der Hindernisfreiheit denkbar und ein besseres Verständnis für die Abschätzung des Sturzrisikos wichtig. Gehen ältere Menschen über eine ebene Fläche, verwenden sie ein breitbasiges Gangbild [172]. In Anwesenheit von Hindernissen jedoch berichten Lowrey et al. [167] im Vergleich zu jungen, gesunden Teilnehmern die Verwendung von engeren Schritten. Die Autoren hypothesieren, dass dieses Verhalten eine Einschränkung der „jugendlichen“ Flexibilität in der Anpassung der Bewegung an die äußeren Anforderungen darstellt, also dass die flexible Reaktion auf externe Störfaktoren des Gleichgewichts erschwert ist. Die Folge ist eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Gleichgewichtsverlusten. Ergebnisse von Pan et al. [152] liefern ebenfalls Hinweise für die Annahme, dass ein schmales Gangbild mit einem erhöhten Sturzrisiko assoziiert ist. Teilnehmer mit erhöhtem Sturzrisiko überqueren hier die Hindernisse mit engeren Schritten. Neben der Koordination der Beine ist die Gleichgewichtskontrolle für eine sichere Hindernisüberwindung ausschlaggebend. Dennoch ist der Einfluss des Alters auf die Kontrolle des Oberkörpers noch wenig untersucht. Untersuchungen von Hahn et al. [147] zeigen, dass Menschen mit Defiziten der Balance in Anwesenheit von Hindernissen stärker mit dem Körperschwerpunkt schwanken, als Menschen mit intakter Gleichgewichtskontrolle.

In einer zuvor durchgeführten Studie zeigen die Autoren, dass die Bewegungen in der anterior-posterioren Ebene mit steigender Hindernishöhe zunehmen [162].

1.3.4 IPS-Patienten: Gehen über Hindernisse

In Anwesenheit von Hindernissen scheint sich die Gangstörung beim IPS zu verstärken [154]. Knapp ein Drittel der Stürze ereignen sich beim Gehen über Hindernisse [64]. Wie in der Literatur bereits beschrieben, gehen IPS-Patienten verglichen mit gesunden Kontrollpersonen über ebene Flächen mit reduzierter Geschwindigkeit und Schrittlänge [173]. Alcock et al. [48] zeigen eine reduzierte Fußfreiheit bei IPS-Patienten, was vermutlich auf die Ganghypokinese zurückzuführen ist. Für die Hindernisfreiheit können zum Teil keine Unterschiede zwischen IPS-Patienten und gesunden Studienteilnehmern gezeigt werden [174], während Vitório et al. [175] eine Reduktion der Hindernisfreiheit in fortgeschrittenen Erkrankungsstadien beobachten. Stegemöller et al. [154] beschreiben eine Zunahme der Hindernisfreiheit, wobei die Ergebnisse keine Signifikanz erreichen. Ebenfalls Folge der Ganghypokinese scheint der Einfluss des IPS auf die Distanz zwischen Ferse und Hindernis zu sein, die in der Literatur häufig als verringert beobachtet wird [175]. Die Distanz zwischen Zehenspitzen und Hindernis scheint sich nicht so deutlich zu verändern. Galna et al. [174] sehen die unveränderte Distanz als mögliches Risiko, da IPS-Patienten die Kompensation ihrer reduzierten Schrittlänge fehlen könnte. Ob es einen Effekt des IPS auf die Schrittbreite gibt, ist bislang ebenfalls unklar. Galna et al. [174] beobachten eine größere Schrittbreite beim IPS, während andere Studien keine Unterschiede der Schrittbreite zwischen gesunden Probanden und IPS-Patienten beschreiben [74]. Denkbar ist ein breiteres Schrittmuster, um Gleichgewichtsstörungen kompensieren zu können, aber auch ein enger Gang als Folge von Steifigkeit und Bewegungsarmut. Im Hinblick auf zeitliche Gangparameter kann im Gangmuster von IPS-Patienten eine Zunahme der Doppelstandphase beim normalen Gang festgestellt werden [176]. In Anwesenheit von Hindernissen scheint das IPS zu einem Anstieg der instabilen Einzelstandphase zu führen. Galna et al. [174] vermuten auch hier die Ganghypokinese als ursächlichen Mechanismus. Der längere Verbleib in der Einzelstandphase bedeutet einen größeren Anspruch an die Muskelkraft der Beine und an die Gleichgewichtscoordination. IPS-Patienten sind dann aufgrund der posturalen Instabilität und weiteren motorischen Defiziten besonders sturzgefährdet [167]. Weiterhin wird bereits ein Zusammenhang zwischen erhöhter Variabilität räumlich-zeitlicher Parameter und dem IPS beobachtet. Eine erhöhte Variabilität kommt durch vermehrte Korrekturschritte zustande und spricht für Unsicherheiten im Gang. Möglicherweise können dadurch jedoch andere Defizite kompensiert werden [177]. Zu den wesentlichen Faktoren für die hohe Sturzrate beim IPS zählt auch die posturale Instabilität [178]. Die

abrupten Bewegungen des Körpers während der Hindernisüberwindung stellen eine größere Herausforderung für die Gleichgewichtskontrolle dar. Denkbar ist daher eine Verstärkung der posturalen Instabilität, die durch Auslenkungen des Oberkörpers gemessen werden kann [147]. Auffälligkeiten der Oberkörperstabilität bei IPS-Patienten werden mithilfe von posturographischen Untersuchungen in verschiedenen Situationen beobachtet [179] [180]. Untersuchungen von Galna et al. [174] und Stegemöller et al. [154] geben erste Hinweise, dass IPS-Patienten auch Hindernisse mit stärkeren Auslenkungen des Oberkörpers zur Seite (mediolaterale Schwankungen) überqueren. Stegemöller et al. [154] zeigen zudem eine Reduktion der Oberkörperbewegungen nach vorne und hinten (anterior-posteriore Schwankungen).

1.4 Fragestellung und Hypothesen

Ein besseres Verständnis für den Einfluss des physiologischen Alterungsprozesses und des IPS auf das Sturzrisiko beim Gehen über Hindernisse ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. Der Fokus liegt dabei auf den räumlich-zeitlichen Gangparametern, die wichtige Hinweise über das Risiko aufzeigen können, inwiefern das Hindernis berührt werden könnte und damit ein erhöhtes Stolperrisiko und folglich erhöhtes Sturzrisiko besteht. Zudem richtet sich der Blick auf bestimmte Winkel zwischen Oberkörper und Beinen, um Informationen über die Oberkörperstabilität gewinnen zu können. Weiterhin soll der Zusammenhang zwischen einer positiven Sturzanamnese und den untersuchten Gangparametern analysiert werden. Um die Auswirkungen alters- und IPS-spezifischer Veränderungen auf klinische Parameter darstellen zu können, werden die beiden Kohorten mit gesunden, jungen Probanden verglichen.

Die folgenden Hypothesen werden geprüft:

- Der physiologische Alterungsprozess und Einschränkungen im Rahmen des IPS gehen bei der Überwindung eines 10 cm hohen Hindernisses mit Veränderungen räumlich-zeitlicher Gangparameter und der Oberkörperstabilität einher.
- Der physiologische Alterungsprozess und das IPS gehen bei der Überwindung eines 20 cm hohen Hindernisses mit Veränderungen räumlich-zeitlicher Gangparameter und der Oberkörperstabilität einher.
- Die Anpassung von Gangverhalten und Oberkörperstabilität an die Veränderung der Hindernishöhe unterscheidet sich zwischen den drei Kohorten.

- Teilnehmer mit positiver Sturzanamnese unterscheiden sich hinsichtlich demographischer Daten und klinischer Gangparameter von Teilnehmern, die in der Vergangenheit noch keine Stürze erlebt haben.

2 Material und Methoden

2.1 Studienaufbau

Im Rahmen des Projekts Keep Control (www.keep-control.eu) wurde am Standort Kiel eine sensorbasierte Bewegungsanalyse zur Erfassung und Validierung von physiologischen und pathologischen Bewegungsmustern durchgeführt (DRKS Nummer: DRKS00022998) [181]. Die vorliegende Arbeit bezieht sich dabei auf drei selektierte Probandengruppen, die von Dezember 2018 bis Mai 2020 für die oben erwähnte Studie rekrutiert wurden.

2.1.1 Ethik

Die vorliegende Studie ist von der Ethik-Kommission des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein (UKSH) Standort Kiel beraten worden (Projekt-Nummer D438/18).

2.1.2 Studienpopulation

2.1.2.1 Probandenkollektiv

Insgesamt wurden für die Untersuchungen dieser Arbeit 33 Probanden rekrutiert. Die Probanden ließen sich in drei Kohorten unterteilen. Neben 14 gesunden, jungen Erwachsenen (≤ 55 Jahre; JE = junge Erwachsene) und 10 gesunden, älteren Erwachsenen (≥ 55 Jahre; AE = alte Erwachsene) wurden 9 Teilnehmer mit IPS eingeschlossen. Die Rekrutierung erfolgte in der Klinik für Neurologie des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein, Campus Kiel. Die gesunde Kohorte setzte sich primär aus Angehörigen von Patienten, sowie Studenten der medizinischen und technischen Fakultäten in Kiel zusammen. Ein weiterer Teil wurde durch Flyer auf die Studie aufmerksam. Patienten mit einem nach standardisierten Kriterien diagnostizierten IPS (ICD 10: G20.X) wurden entweder während einer stationären Behandlung

untersucht oder im Rahmen eines Aufenthalts in der Ambulanz für Bewegungsstörungen des UKSH auf die mögliche Teilnahme an der Studie angesprochen.

Tabelle 1: Gruppen und Probandenanzahl

	JE	AE	IPS
rekrutierte Probanden	N = 14	N = 10	N = 9
männlich/weiblich	10/4	8/2	7/2

AE: Alte Erwachsene; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: Junge Erwachsene; N: Anzahl der Probanden.

2.1.2.2 Rekrutierung

Anhand von Krankenakten der stationären Patienten, Informationen über den gesundheitlichen Zustand durch das medizinische Personal sowie einem ersten persönlichen Eindruck oder einem telefonischen Gespräch wurden die Probanden selektiert. Nach erfolgter Auswahl und bestätigtem Interesse der Probanden, an der Studie teilzunehmen, erfolgte eine ausführliche mündliche und schriftliche Aufklärung. Untersuchungsziele, Ort, Zeitpunkt und Dauer der Untersuchung wurden kommuniziert. Alle Teilnehmer gaben ihr schriftliches Einverständnis für die Teilnahme an der Studie und der pseudonymisierten Verwendung der erhobenen Daten. Die Verwendung von Probandenidentifikationsnummern (ID) ermöglichte den verschlüsselten Umgang mit allen Daten. Videoaufzeichnungen während der Bewegungsuntersuchung wurden mit GoPro Kameras durchgeführt und sind in der Datenbank der Klinik für Neurologie (UKSH) hinterlegt. Um einen einheitlichen Bedingungsrahmen zu schaffen, trugen die Probanden für die Messung ein festes Schuhwerk ohne Absatz, ein ärmelloses Shirt und eine kurze Hose. IPS-Patienten wurden an die zeitgerechte Einnahme der Medikation erinnert.

2.1.2.3 Einschlusskriterien

Grundlegende Voraussetzung für die Teilnahme aller Probanden war das Erreichen von > 15 Punkten im MOCA (Montreal Cognitive Assessment). Dadurch wurde eine ausreichende kognitive Fähigkeit sichergestellt, um die Einverständniserklärung zu verstehen und den

Instruktionen während der Untersuchungen folgen zu können. Weiterhin mussten alle Probanden in der Lage sein, die Bewegungsanalyse über einen Zeitraum von drei Stunden ohne Gehhilfen absolvieren zu können. Für die erkrankte Kohorte zählte zudem die sichere Diagnose des IPS zu den Einschlusskriterien. Keiner der IPS-Patienten litt unter FOG oder Dyskinesien.

2.1.2.4 Ausschlusskriterien

Mit Ausnahme des IPS zählten Erkrankungen, die zu Einschränkungen von Motorik und Gangbild führen, zu den Ausschlusskriterien. Keiner der IPS-Patienten litt unter FOG oder Dyskinesien. Ein Alter < 18 und das Vorhandensein eines Herzschrittmachers sowie die Notwendigkeit einer Gehhilfe führten ebenfalls zum Ausschluss. Die genauen Ein- und Ausschlusskriterien sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Ein- und Ausschlusskriterien der Studienteilnehmer

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> - > 15 Punkte im MOCA - Gehfähigkeit ohne Hilfsmittel - IPS: klinisch gesicherte Diagnose durch auf Bewegungsstörungen spezialisierten Neurologen /in 	<ul style="list-style-type: none"> - Implantierter Herzschrittmacher - Notwendigkeit einer Gehhilfe - IPS: FOG oder Dyskinesien - Erkrankungen mit Einfluss auf die Motorik (außer IPS) - Alter < 18 Jahre

MOCA: Montreal Cognitive Assessment; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom.

2.2 Räumlichkeit und Equipment

Für die ausführliche Untersuchung der Probanden stand das Motoriklabor der Neurologie (Erdgeschoss) am UKSH, Campus Kiel zur Verfügung. Es wurde eine umfangreiche, quantitative Bewegungsanalyse mit zwei Messsystemen und verschiedenen standardisierten Bewegungsaufgaben durchgeführt. Neben verschiedenen Gangtests wie dem Timed up and

Go (TUG) und geschwindigkeitsadaptiertem Gehen, waren Gleichgewichtsübungen und Alltagsaktivitäten Teil der Erhebung. Die Erfassung von Bewegungen erfolgte dabei mit zwei verschiedenen Messsystemen. Einerseits wurde ein System mit Inertialsensoren (Inertial Measurement Units, IMUs) verwendet (MyoMotion®, Noraxon Inc, Scottsdale Arizona, USA). Andererseits wurde das System Qualisys® (Qualisys AB, Göteborg, Sweden) verwendet. Für diese Arbeit wurden ausschließlich die Daten des Qualisys® Kamerasystems verwendet. Als Grundlage der 3D Motion Capture Bewegungsanalyse verfügt das Motoriklabor über 12 hochauflösende Infrarotkameras. Die Kombination mit sphärischen, reflektierenden Markern ermöglicht über die Infrarotinteraktion den Entwurf dreidimensionaler Bilder für eine hochpräzise Aufzeichnung von Bewegungen des menschlichen Körpers. Mit insgesamt 55 Markern wurden anatomische Landmarken aufgesucht, wobei insbesondere leicht auffindbare Knochenvorsprünge markiert wurden. Zuvor wurde sichergestellt, dass die Marker den Bewegungsablauf nicht oder vernachlässigbar beeinträchtigen. Ein Klettband an speziellen, elastischen Vorrichtungen oder ein hautverträgliches, doppelseitiges Klebeband dienten der Befestigung am Körper der Probanden. Vorder- und Hinterseite des Kopfes, Schultern, Thorax, Becken sowie die gesamte obere und untere Extremität wurden mit Markern versehen.

Tabelle 3: Lokalisation der relevanten Marker für die Untersuchungen

Thorax	
Sternum 1	Mitte des Sternums, unterhalb des Sternoklavikulargelenks
Sternum 2	Unter und links von Sternum 1
Sternum 3	Unter und rechts von Sternum 1
Hüfte	
SIAS	Spina iliaca anterior superior
SIPS	Spina iliaca posterior superior
Untere Extremitäten	
Sprungelenk außen	malleolus medialis tibiae
Ferse	Kalkaneus auf derselben Höhe des Vorfußmarkers
Vorfuß	Auf Höhe der Zehen in der Mitte des Schuhs

Um den Untersuchungsbereich zu markieren, wurde vor jeder Untersuchung eine Kalibrierung durchgeführt. Eine Ecke des Untersuchungsbereiches wurde mit einem Kalibrierungs-Rahmen gekennzeichnet. Anschließend wurde der entsprechende Bereich mithilfe eines T-förmigen

Stabes abgefahren, an dessen Ende sich zwei Marker befanden. Eine Software zeigte dem Untersucher, ob er im Zeitraum von 120 Sekunden den gesamten Bereich in allen Dimensionen erfasst hat. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau der Untersuchungsfläche im Motoriklabor.

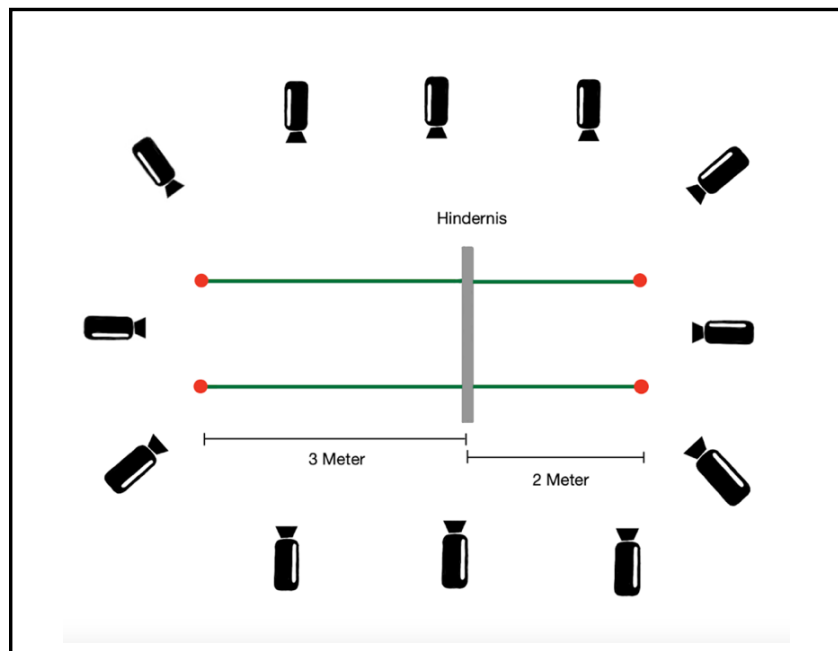


Abbildung 2: Untersuchungsfläche im Motoriklabor.

2.3 Untersuchungen

Vor Ausstattung mit dem entsprechenden Equipment wurden von allen Probanden personenbezogene, soziodemographische Daten anhand von validierten Fragebögen und skalenbasierten Informationen erfasst. Alter, Gewicht, Größe und Sensibilitätsprüfung durch den Stimmgabeltest, aber auch Information zu Vorerkrankungen, Alltagsfähigkeiten, Mobilität und Selbsteinschätzung wurden erhoben. Zudem wurde die aktuelle Medikamenteneinnahme zum Zeitpunkt der Untersuchung erfragt und gegebenenfalls mithilfe der Krankenakte ergänzt. Die IPS-Patienten wurden immer nach Einnahme der Antiparkinsonmittel, also im medikamentösen ON-Status gemessen. Auf die Messung im OFF-Status wurde verzichtet. Patienten mit einem IPS wurden zudem über den Zeitpunkt der Diagnosestellung befragt.

2.3.1 Sturzanamnese

Der Strength, assistance with walking, rising from a chair, climbing stairs, and falls (SARC-F) Questionnaire ermöglicht ein schnelles Screening auf eine vorliegende Sarkopenie [182]. 5 Fragen werden mit jeweils 0 bis 2 Punkten bewertet. Neben Informationen über Muskelkraft, Gangfähigkeit, Transfer aus einem Stuhl/Bett und Treppensteigen beinhaltet der Fragebogen das für diese Arbeit relevante Sturzverhalten innerhalb der letzten 12 Monate.

- kein Sturz = 0 Punkte
- 1-3 Stürze = 1 Punkt
- ≥ 4 Stürze = 2 Punkte

2.3.2 Movement Disorder Society-revised version of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS)

Die Quantifizierung motorischer Fähigkeiten und die Verlaufsbeurteilung erfolgen beim IPS durch international anerkannte Bewertungsskalen. Die vorgelegte Arbeit verwendete die von der MDS (Movement Disorder Society) überarbeitete, neueste Version (MDS-UPDRS III) [183], die sich in 4 Abschnitte gliedert. Neben einer Befragung über kognitive Fähigkeiten, Stimmungslage und funktionelle Mobilität im Alltag wird das Augenmerk im dritten Teil auf die motorischen Symptome gelegt. Unter präziser Anleitung prüft der Untersucher u.a. Motorik, Gangbild, Sprache und Gesichtsausdruck. Alle Unterpunkte (Items) der Untersuchung und Befragung werden interpretiert und jeweils mit 0 Punkten bei fehlenden Auffälligkeiten, bis 4 Punkten bei maximaler Symptomausprägung bewertet. Insgesamt beinhaltet die Skala 65 Items, von denen bei 48 eine Zahl von 0 bis 4 gewählt werden muss und 7 Items mit Ja oder Nein beantwortet werden [183].

2.3.3 Hoehn & Yahr-Stadien

IPS-Patienten wurden zudem anhand der Hoehn & Yahr-Skala beurteilt. Dies ist ein international verwendetes und einfaches klinisches Instrument, um den Schweregrad der IPS-Erkrankung einschätzen zu können. Im Rahmen des IPS werden 5 Stadien unterschieden. Sie reichen von milden Einschränkungen nur einer Körperhälfte (Stadium 1) und bilateraler Manifestation (Stadium 2) über Defizite der posturalen Stabilität (Stadium 3) bis hin zum

Verlust der funktionellen Unabhängigkeit (Hilfsmittel für Mobilität notwendig, Stadium 4) und der Rollstuhlpflichtigkeit oder Bettlägerigkeit (Stadium 5) [184] [185].

2.3.4 Montreal Cognitive Assessment Test (MoCA)

Der MoCA ist ein einfacher Test mit 30 Unterpunkten, welcher innerhalb von etwa 10 Minuten eine gute Erfassung der globalen kognitiven Leistungsfähigkeit ermöglicht. Der Score gliedert sich in verschiedene Kategorien, bei denen jeweils eine unterschiedliche maximale Anzahl an Punkten erreicht werden kann. Neben visuell-räumlichen Fähigkeiten und Exekutivfunktionen werden folgende Kategorien geprüft: Gedächtnis, Aufmerksamkeit, Sprache, Benennen, Orientierung und Abstraktion. Insbesondere zur Detektion von leichten kognitiven Defiziten hat der Test eine hohe Sensitivität und Spezifität. Er eignet sich daher gut zur Erkennung eines milden kognitiven Defizits (MCI: mild cognitive impairment), das bei IPS-Patienten gehäuft vorkommt. Erreicht die getestete Person weniger als 26 Punkte, wird von einem MCI ausgegangen [186] [187].

2.3.5 Hindernisüberwindung

Die Probanden absolvierten eine Gehstrecke von 5 Metern. Als Unterlage wurde ein einfacher, grauer Teppich auf hartem Linoleumboden im Motoriklabor verwendet. Start und Ende der Strecke wurden jeweils mit zwei roten Hütchen versehen und jedes Hütchen mit einem Qualisys® Marker ausgestattet. 3 Meter von der Startlinie entfernt, befand sich eine Schaumstoff-Stange auf zwei Hütchen. Die Stange wurde an ihren Enden ebenfalls mit Qualisys® Markern versehen. Die Instabilität der Hindernisse reduzierte die Verletzungsgefahr im Falle eines Sturzes. Im Rahmen von Hinderniskontakten wäre die Schaumstoff-Stange von den Hütchen gefallen und die Wahrscheinlichkeit zu stolpern wäre gesunken.

Im ersten Durchgang ging der Proband bei selbst gewählter Geschwindigkeit die vorgegebene Strecke, überquerte das Hindernis und blieb hinter der Markierung stehen.

Anschließend wurde das Hindernis mit einer vorgefertigten Unterlage von 10 cm auf 20 cm erhöht. Währenddessen begab sich der Proband zurück auf seine Startposition. Der Rückweg wurde nicht in die Messung einbezogen. Dann ging der Proband erneut bei selbst gewählter Geschwindigkeit über das Hindernis bis zum Ende der Strecke.

Um den Einfluss der Beschleunigung auf das Verhalten der Probanden von der Messung auszuschließen, gingen die Teilnehmer einen Meter vor der Startlinie los und stoppten einen halben Meter hinter der Stopplinie. Die Instruktion lautete: „Gehen Sie in einem für Sie persönlich angenehmen Tempo“. Die Probanden wählten selbstständig aus, mit welchem Bein sie das Hindernis zuerst überquerten.

Tabelle 4: Eigenschaften der Hindernisse

Lokalisation	3 m nach Beginn der Startlinie
Höhe niedriges Hindernis	10 cm
Höhe hohes Hindernis	20 cm
Hindernisbreite	1 m

Tabelle 5: Aus Kamera-basierten Daten extrahierte Parameter zur Untersuchung der Hindernisüberwindung und die in der Literatur bereits bekannten Veränderungen dieser Parameter bei älteren Menschen und IPS-Patienten

Parameter	Definition	Assoziation und Datenlage
Hindernisfreiheit	Distanz zwischen Fuß u. Hindernis in vertikaler Ebene	Zu niedrige und zu hohe Werte können das Sturzrisiko erhöhen. In Studien zeigen sich für AE* und IPS niedrigere [169] [188], unveränderte [150]* [189] und höhere [152]* [154] Werte.
Zehenspitzen-Hindernis-Distanz	Distanz zwischen Fuß und Hindernis in horizontaler Ebene	Eine zu geringe Distanz vor dem Hindernis spricht für ein vorsichtiges Verhalten, kann jedoch das Risiko für Hinderniskontakte erhöhen [154] [163]. Bisher keine eindeutigen Studienergebnisse. Zum Teil geringere Distanzen bei AE [168] und IPS [173].
Fersen-Hindernis-Distanz	Distanz zwischen Fuß u. Hindernis in horizontaler Ebene	Eine geringe Distanz ist als risikoreich zu werten [167]. Die Literatur zeigt geringere Werte für AE [167] und IPS [175].

Schrittbreite	Distanz zwischen beiden Füßen	Eine geringe Schrittbreite verhindert eine schnelle Anpassung an Auslenkungen des Oberkörpers [167]. Die Studienlage ist bislang nicht eindeutig. Bei AE [167] werden bereits geringere Werte festgestellt. Bei IPS [74] zeigen sich meist unveränderte Werte.
Oberkörperstabilität	Winkel zwischen Füßen u. Hüfte, zwischen Füßen und Brustkorb sowie zwischen Hüfte u. Brustkorb	Größere Auslenkungen des Oberkörpers beeinträchtigen die Gleichgewichtskontrolle [190]. Das Verhalten der Oberkörperstabilität bei der Hindernisüberwindung ist bislang wenig untersucht. Für AE [162] können zum Teil größere Auslenkungen festgestellt werden. Bei IPS zeigen sich sowohl geringere [191], als auch verstärkte [190] Oberkörperauslenkungen.

AE: Alte Erwachsene; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom

Als Hindernisfreiheit galt die Distanz zwischen Zehenspitzen und Hindernis, während sich das Bein in der Schwungphase genau über dem Hindernis befand. Eine geringe Hindernisfreiheit erhöht das Risiko für einen Hinderniskontakt in der Schwungphase [152]. Kommt es zu einem unerwarteten Kontakt, kann es zu Gleichgewichtsverlusten und folglich zu Stürzen kommen. Eine sehr große Hindernisfreiheit führt zu einer Verlängerung der instabilen Einzelstandphase und erhöht dadurch das Sturzrisiko [154]. Sowohl bei gesunden älteren Menschen, als auch bei IPS-Patienten werden im Vergleich mit einer jungen Kohorte bereits Veränderungen dieses Parameters gezeigt [154] [175]. Die horizontale Distanz vor dem Hindernis beschreibt den Abstand zwischen Zehenspitzen und Hindernis, bevor der Fuß angehoben wird. Ist dieser gering, bleibt nicht genug Abstand um eine ausreichende Hindernisfreiheit zu erreichen [168]. Ein zu großer Abstand hingegen würde das Risiko erhöhen, mit der Ferse auf das Hindernis zu treten [174]. Bislang gibt es nicht genug Evidenz, um den Einfluss des Alters und des IPS auf die Zehenspitzen-Hindernis-Distanz interpretieren zu können [150] [174]. Die Fersen-Hindernis-Distanz hingegen, welche den Abstand zwischen Ferse und Hindernis bei

Positionierung des Fußes am Ende der Schwungphase beschreibt, scheint sich im höheren Alter und bei IPS-Patienten zu reduzieren. Daher wird sie mit einem erhöhten Sturzrisiko assoziiert [154] [168] [192]. Die Schrittbreite beschreibt, wie weit die Füße beim Gehen voneinander entfernt sind. Ein breites Schrittmuster erhöht die Stabilität des Gleichgewichtes und erleichtert die dynamische Balance. Je enger die Schritte sind, desto schwieriger kann der Körper durch Ausgleichbewegungen eingependelt werden [167]. Die Messung der Winkel zwischen Beinen und Hüfte, zwischen Beinen und Brustkorb, sowie zwischen Hüfte und Brustkorb soll eine Aussage über die Auslenkungen des Oberkörpers und damit über die Stabilität des Oberkörpers ermöglichen. Große Winkel zwischen Oberkörper und unterer Extremität bzw. Hüfte bedeuten eine größere Entfernung des Oberkörpers von der Unterstützungsfläche und folglich größere Ansprüche an die Gleichgewichtskontrolle. Der Alterungsprozess und das IPS führen durch Defizite sensorischer Fähigkeiten und durch Reduktion der Muskelkraft zu Einschränkungen der Gleichgewichtskontrolle [107] [167] [193]. Das könnte sich in den Messungen der Oberkörperstabilität widerspiegeln. Es gibt bereits Hinweise dafür, dass IPS-Patienten ihr Verhalten an unterschiedliche Hindernishöhen anpassen können und dadurch krankheitsspezifische Defizite kompensieren [173]. Mithilfe der Subtraktion der gemessenen Parameter für das 20 cm hohe Hindernis von den Parametern für das 10 cm hohe Hindernis soll die Anpassung des motorischen Verhaltens an die Hindernishöhe untersucht werden. Der Vergleich dieser Parameter soll zeigen, ob alle Kohorten das gleiche Ausmaß an Veränderungen vornehmen.

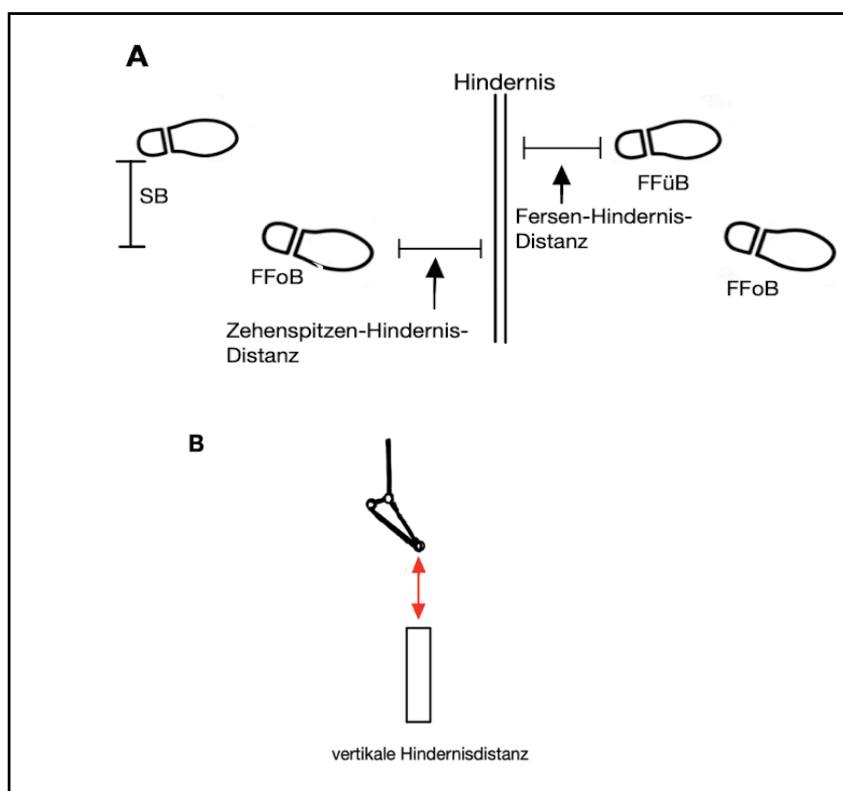


Abbildung 3: Schematische Darstellung der räumlich-zeitlichen Gangparameter. A: räumlich-zeitliche Gangparameter vor, über und hinter dem Hindernis. Abkürzungen: FFoB = Fuß des Folgebeins; FFüB = Fuß des Führungsbeins; SB = Schrittbreite. B: Hindernisdistanz in der vertikalen Ebene.

2.4 Datenverarbeitung und statistische Auswertung

Mithilfe einer Software (Qualisys Track Manager, AB, Göteborg, Sweden) wurden die Bewegungsmarker nach Speicherung auf einer Festplatte und nachfolgender Darstellung auf dem Bildschirm („Avatar“, Abbildung 4) entsprechend ihrer Position auf den anatomischen Landmarken beschriftet und zugeordnet.

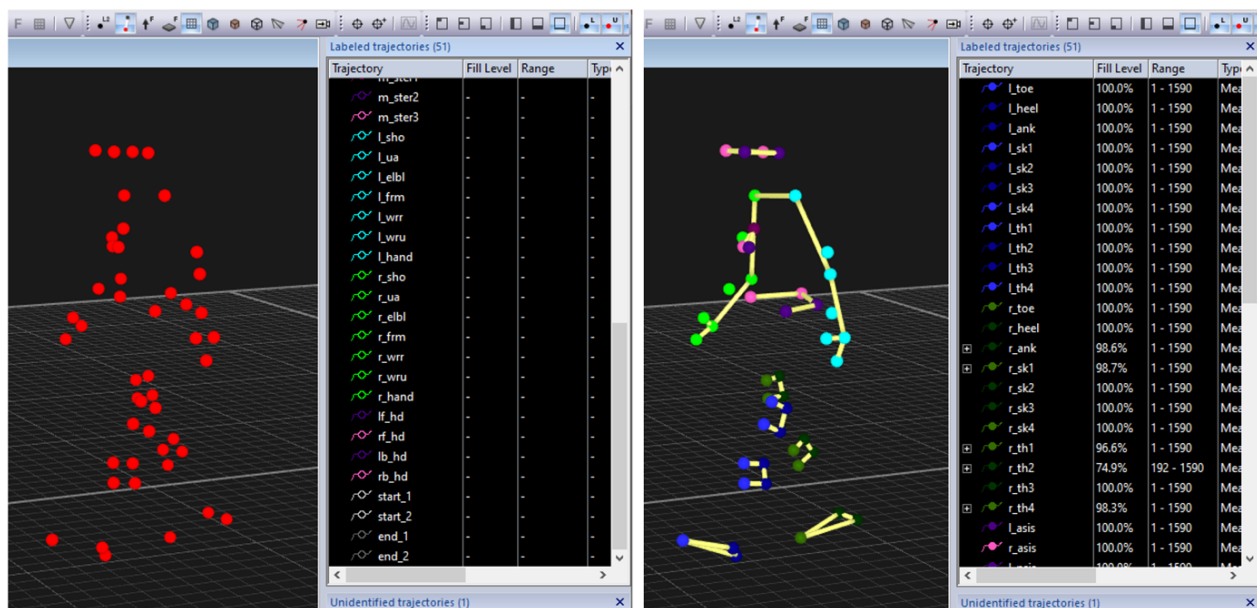


Abbildung 4: Programm zur Verarbeitung der gewonnenen Daten (Qualisys Track Manager, AB, Göteborg, Sweden). Marker, die auf den anatomischen Landmarken der Probanden platziert wurden, mussten nach den Untersuchungen den entsprechenden Körperteilen zugeordnet werden.

Die Beschriftung erfolgte mithilfe eines automatischen Systems, dessen Zuordnung bei Fehlern manuell korrigiert wird (siehe Abbildung 5).

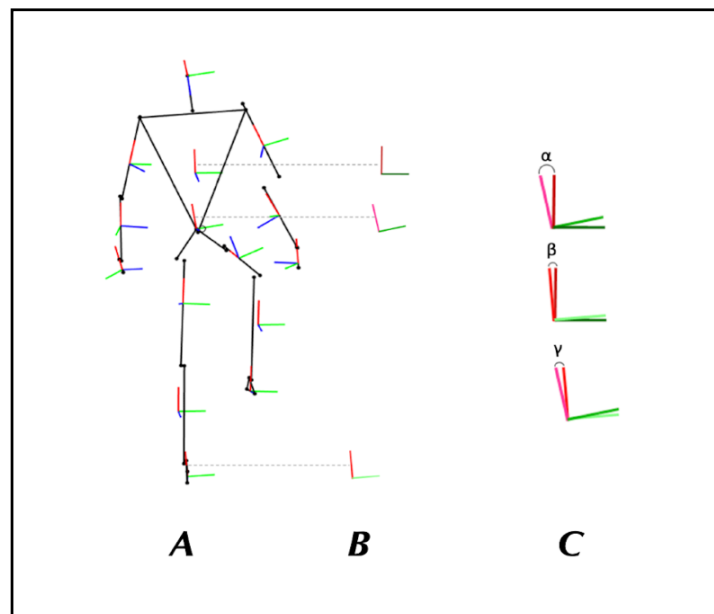


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Messung der Oberkörperstabilität mithilfe von Winkeln zwischen Körpersegmenten. A: Simulation der Orientierung aller Körpersegmente eines Probanden mithilfe eines 3D-Koordinatensystems; B: Orientierung von Fuß, Hüfte und Brustkorb: α : Winkel zwischen Brustkorb und Hüfte; β : Winkel zwischen Brustkorb und Fuß; γ : Winkel zwischen Hüfte und Fuß.

In die statistische Auswertung gingen die Daten von 33 Probanden ein. Mithilfe der Software JASP Version 0.12.2 (JASP, Amsterdam, NL) wurden die Daten analysiert. Die Bewertung demographischer Daten erfolgte mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse (analysis of variance, ANOVA). Die Auswertung der räumlich-zeitlichen Gangparameter und der Oberkörperstabilität zur Überprüfung der Hypothesen 1 und 2 erfolgte mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung. Die Varianzanalyse ermöglicht eine Aussage darüber, ob sich Mittelwerte untersuchter Parameter zwischen mehreren Gruppen unterscheiden und ob dieser Unterschied signifikant ist [194]. ANOVA verhindert zudem eine Überschätzung der Signifikanz [195], und ist Robust gegenüber dem Fehler einer Normalverteilung [196]. Ein p-Wert von < 0.05 wurde in der vorliegenden Studie als signifikant angesehen. Um Unterschiede zwischen den einzelnen Kohorten zu analysieren, wurde der Post Hoc Test verwendet. Das Erkennen von Zusammenhängen wurde mithilfe des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman [197] durchgeführt, was unabhängig von der Normalverteilung der Daten ist. Dieser wurde angewandt, um Zusammenhänge zwischen Sturzrate und klinischen Gangparametern zu untersuchen.

3 Ergebnisse

3.1 Demographische und klinische Daten

Alle Probanden absolvierten die Untersuchungen erfolgreich, sodass die Parameter von 14 JE, 10 AE und 9 IPS-Patienten in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden konnten. Tabelle 4 zeigt klinische und demographische Daten, die anhand von Anamnese und klinischer Untersuchung vor der Bewegungsanalyse erhoben wurden. Signifikante Unterschiede zwischen den Kohorten zeigten sich für den MoCA-Test, das Alter, die Körpergröße und den MDS-UPDRS III. Stürze, FOG oder Festinationen kamen wie erwartet nicht vor. In allen drei Kohorten fand sich ein höherer Anteil männlicher Teilnehmer. IPS-Patienten waren im Durchschnitt 66 Jahre alt, gesunde ältere Teilnehmer (AE) 74 Jahre und die junge Kontrollgruppe (JE) 31 Jahre alt. Zum Zeitpunkt der Bewegungsanalyse lag die durchschnittliche Erkrankungsdauer der IPS-Patienten bei 9 Jahren. Die Bewertung kognitiver Fähigkeiten mithilfe des MoCA-Tests ergab deutliche Unterschiede zwischen den Kohorten. Gesunde junge Probanden erreichten mit 28 Punkten die besten Ergebnisse. IPS-Patienten mit 25 und AE mit 24 Punkten zeigten schlechtere kognitive Ergebnisse, unterschieden sich jedoch nicht signifikant untereinander. IPS-Patienten zeigten mit 31 Punkten im MDRS-UPDRS III deutliche Defizite der motorischen Fähigkeiten. Gesunde ältere Teilnehmer waren mit durchschnittlich 6 Punkten wenig eingeschränkt und gesunde junge Teilnehmer zeigten mit durchschnittlich 1 Punkt wie erwartet kaum Auffälligkeiten der motorischen Fähigkeiten. Weiterhin unterschieden sich die Probanden signifikant hinsichtlich des Gewichts: IPS-Patienten waren mit durchschnittlich 93 kg schwerer als die anderen Kohorten.

Tabelle 6: Parameter aus Anamnese und klinischer Untersuchung

	IPS- Patienten	Gesunde Alte (AE)	Gesunde Junge (JE)	p- Wert	p- Wert IPS vs. AE	p-Wert IPS vs. JE	p- Wert AE vs. JE
N	9	10	14	-	-	-	-
männlich [%]	7 (78)	8 (80)	10 (71,4)	-	-	-	-
Alter [Jahre]	66 ± 9	74 ± 6	31 ± 9	< 0.001	0.143	< 0.001	< 0.001
Größe [cm]	178 ± 9	177 ± 6	180 ± 6	0.571			
Gewicht [kg]	93 ± 16	77 ± 13	76 ± 14	0.021	0.069	0.027	1.000
BMI (0-63)	29 ± 3	24 ± 3	23 ± 3	0.002	0.023	0.002	1.000
MDS- UPDRS III (0-132)	31 ± 25	6 ± 3	1 ± 3	< 0.001	0.001	< 0.001	1.000
Dauer der Krankheit [Jahre]	9	-	-	-	-	-	-
MoCA (0- 30)	25 ± 3	24 ± 3	28 ± 1	< 0.001	1.000	0.015	< 0.001

Dargestellt sind die Mittelwerte, die mithilfe einer Varianzanalyse berechnet wurden. Ein p-Wert von < 0.05 wurde als statistisch signifikant festgelegt und fett markiert. AE: Alte Erwachsene; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: Junge Erwachsene; MDS-UPDRS III: Movement Disorders Society-revised version of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (motorischer Teil); MoCA: Montreal Cognitive Assessment.

3.2 Räumlich-zeitliche Gangparameter und Oberkörperstabilität beim Überwinden des 10 cm hohen Hindernisses

3.2.1 Räumlich-zeitliche Gangparameter

Zunächst wurden die Hindernisfreiheit von Führungs- und Folgebein, die Zehenspitzen-Hindernis-Distanz und die Fersen-Hindernis-Distanz sowie die Schrittbreite der drei Kohorten in Anwesenheit des 10 cm hohen Hindernisses analysiert. Für die Hindernisfreiheit des Folgebeins tendierten die drei Gruppen zu unterschiedlichen Werten ($p = 0.071$). Hinsichtlich der Distanz zwischen Vorfuß und Hindernis sowie Ferse und Hindernis und für die Schrittbreite konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Kohorten gezeigt werden. Der Vergleich räumlich-zeitlicher Schrittparameter zwischen den drei Kohorten ist in Abbildung 6 A-E graphisch dargestellt.

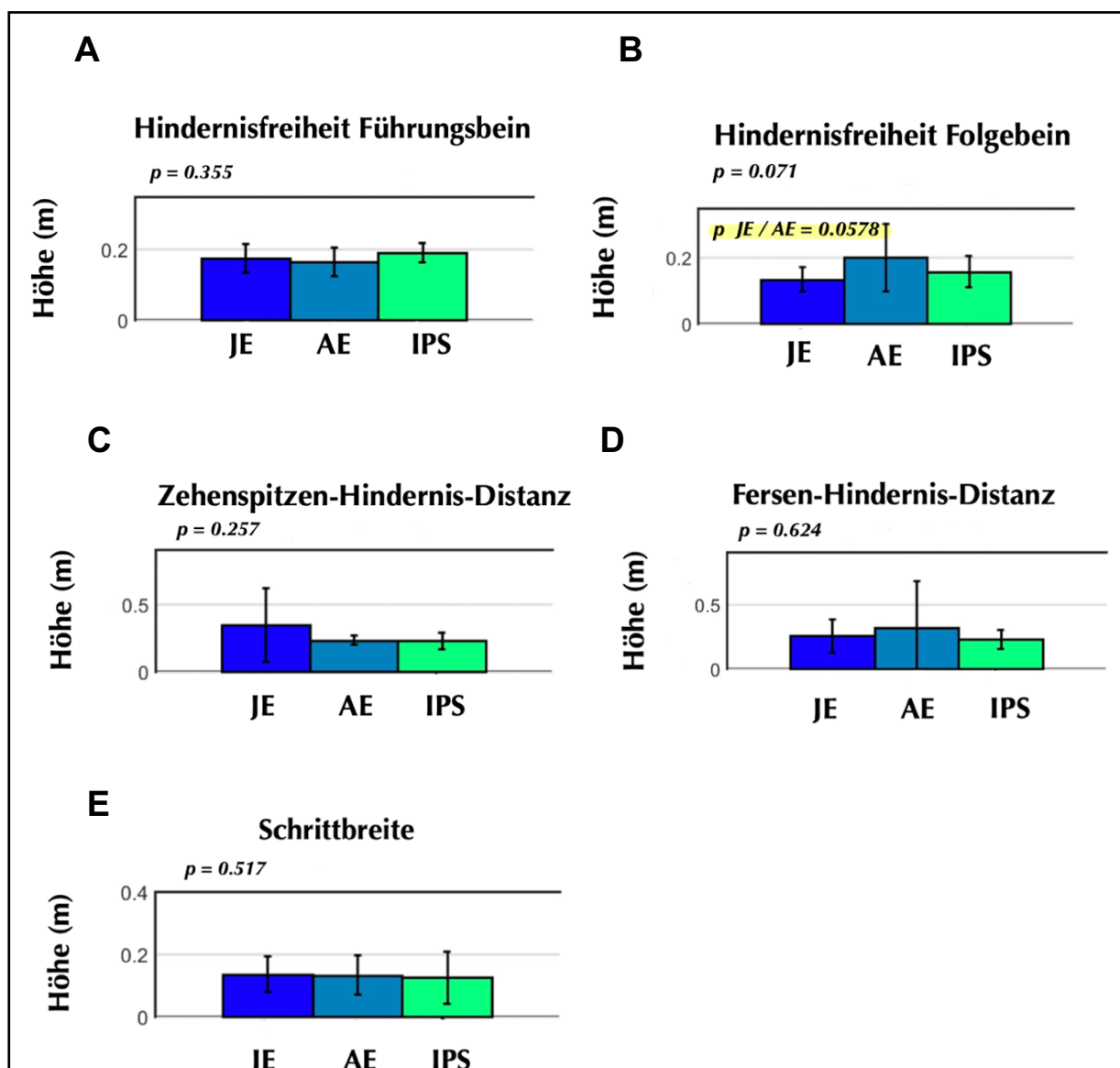


Abbildung 6: Vergleich räumlich-zeitlicher Gangparameter zwischen den drei Kohorten für das 10 cm hohe Hindernis. AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene.

Für den weiteren Vergleich der Hindernisfreiheit des Folgebeins zwischen den drei Kohorten wurde die Post Hoc Analyse verwendet. Wie Tabelle 7 zeigt, tendierten AE im Vergleich zu JE zu einer größeren Hindernisfreiheit ($p = 0.057$).

Tabelle 7: ANOVA-Werte und Post Hoc Analyse der räumlich-zeitlichen Gangparameter beim Überqueren des 10 cm hohen Hindernisses

Parameter	p-Wert ANOVA	Post Hoc JE-AE	Post Hoc JE-IPS	Post Hoc AE-IPS
Hindernisfreiheit (Führungsbein)	0.355			
Hindernisfreiheit (Folgebein)	0.071	0.057	0.679	0.344
Schrittbreite	0.517			
Zehenspitzen-Hindernis-Distanz	0.257			
Fersen-Hindernis-Distanz	0.624			

AE: Alte Erwachsene; ANOVA: Varianzanalyse; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom, JE: junge Erwachsene.

3.2.2 Oberkörperstabilität

Zur Erfassung der Oberkörperstabilität wurden die Winkel zwischen Füßen und Hüfte, zwischen Füßen und Brustkorb sowie zwischen Hüfte und Brustkorb gemessen, um die Auslenkungen des Oberkörpers zu beurteilen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Kohorten fand sich dabei für den Winkel zwischen Hüfte und Brustkorb, während das Führungsbein das Hindernis überquerte ($p = 0.024$). Weiterhin zeigte sich für den Winkel zwischen Führungsbein und Hüfte eine Tendenz zu Unterschieden zwischen den drei Kohorten. Für die Winkel zwischen Führungsbein und Brustkorb, zwischen Hüfte und Brustkorb während des Führungsschritts sowie zwischen Folgebein und Hüfte und Folgebein und Brustkorb ergaben sich keine Unterschiede zwischen den drei Kohorten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 A-E dargestellt.

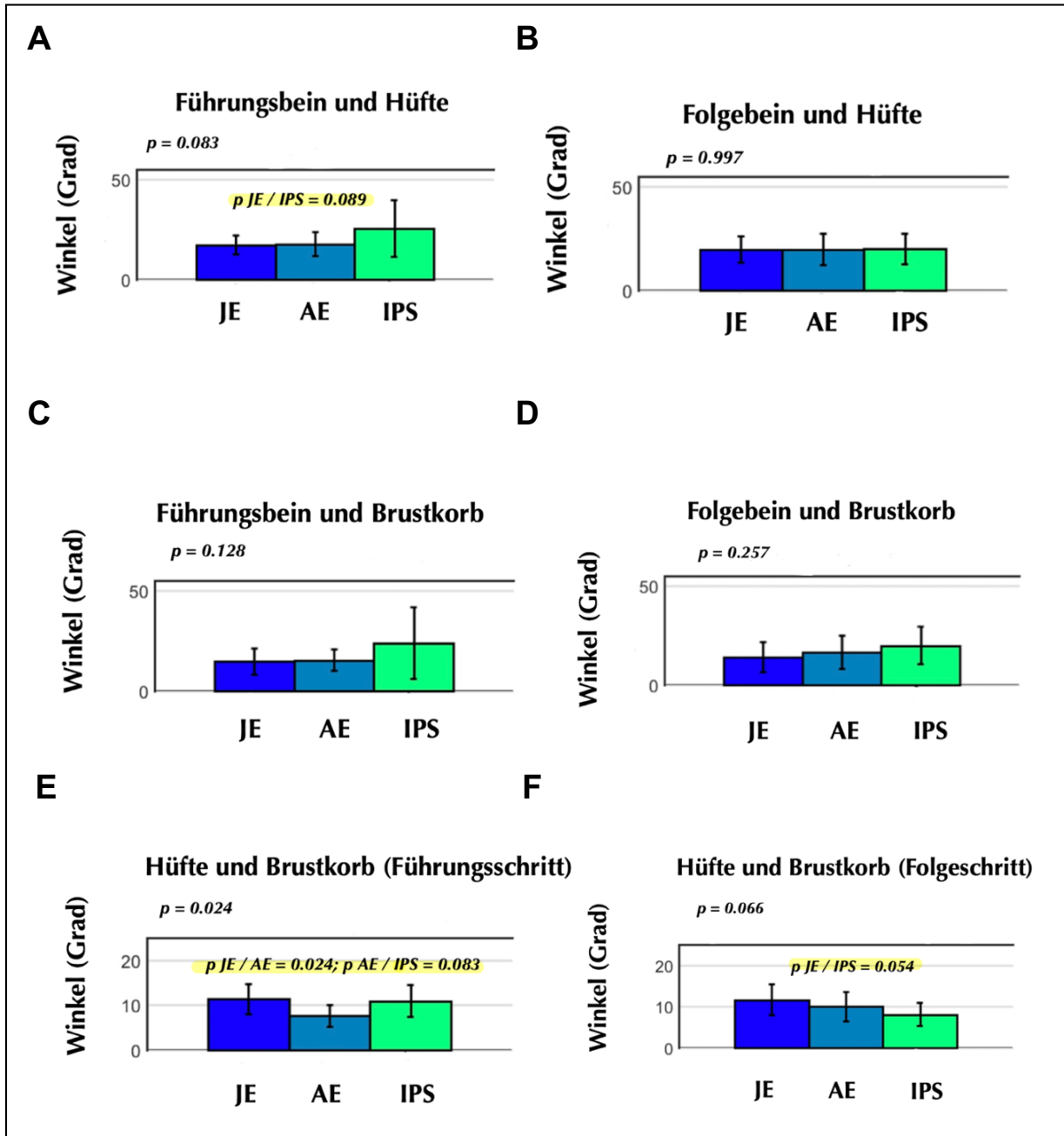


Abbildung 7: Vergleich der Oberkörperstabilität mithilfe von Winkelmessungen verschiedener Körpersegmente zwischen den drei Kohorten für das 10 cm hohe Hindernis. AE: alte Erwachsene; Führungsschritt: Schwungphase, in der sich das Führungsbein über dem Hindernis befindet; Folgeschritt: Phase, in der sich das Folgebein über dem Hindernis befindet; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene.

Für den weiteren Vergleich zwischen den drei Kohorten wurde die Post Hoc Analyse genutzt. Für den signifikanten Unterschied der Distanz zwischen Hüfte und Brustkorb während des Führungsschritts zeigte sich dabei, dass AE einen signifikant geringeren Winkel als JE aufwiesen ($p = 0.024$). Ein nicht signifikanter, jedoch deutlicher Unterschied zeigte sich auch zwischen AE und IPS, wobei AE das Hindernis mit einem kleineren Winkel zwischen Hüfte

und Brustkorb überquerten ($p = 0.083$). Für den Winkel zwischen Führungsbein und Hüfte ergab die Post Hoc Analyse, dass IPS-Patienten verglichen mit der gesunden jungen Kohorte zu einem größeren Winkel tendierten. Auch für den Winkel zwischen Hüfte und Brustkorb während des Folgeschritts fand sich eine Tendenz in Richtung eines unterschiedlichen Verhaltens zwischen den Kohorten. Hier hingegen tendierten IPS-Patienten im Vergleich zur gesunden jungen Kohorte in Richtung kleinerer Werte. Die Daten der Post Hoc Analyse sind in Tabelle 8 aufgezeigt.

Tabelle 8: ANOVA-Werte und Post Hoc Analyse der Oberkörperstabilität beim Überqueren des 10 cm hohen Hindernisses

Parameter	p-Wert ANOVA	Post Hoc JE-AE	Post Hoc JE-IPS	Post Hoc AE-IPS
Führungsbein und Hüfte	0.083	0.991	0.089	0.164
Führungsbein und Brustkorb	0.128			
Hüfte und Brustkorb (Führungsschritt)	0.024	0.024	0.943	0.083
Folgebein und Hüfte	0.997			
Folgebein und Brustkorb	0.257			
Hüfte und Brustkorb (Folgeschritt)	0.066	0.511	0.054	0.466

AE: Alte Erwachsene; ANOVA: Varianzanalyse; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom, JE: junge Erwachsene.

3.3 Räumlich-zeitliche Gangparameter und Oberkörperstabilität beim Überwinden des 20 cm hohen Hindernisses

3.3.1 Räumlich-zeitliche Gangparameter

In einem zweiten Durchgang wurde das Hindernis auf 20 cm erhöht und die Probanden wiederholten die Hindernisüberwindung. Für die Hindernisfreiheiten, die Zehenspitzen-Hindernis-Distanz und die Fersen-Hindernis-Distanz sowie für die Schrittbreite wurden keine Unterschiede zwischen den drei Kohorten nachgewiesen. Der Vergleich des Verhaltens

zwischen den drei Kohorten beim Überqueren des 20 cm hohen Hindernisses ist in Graphik 8 A-E dargestellt.

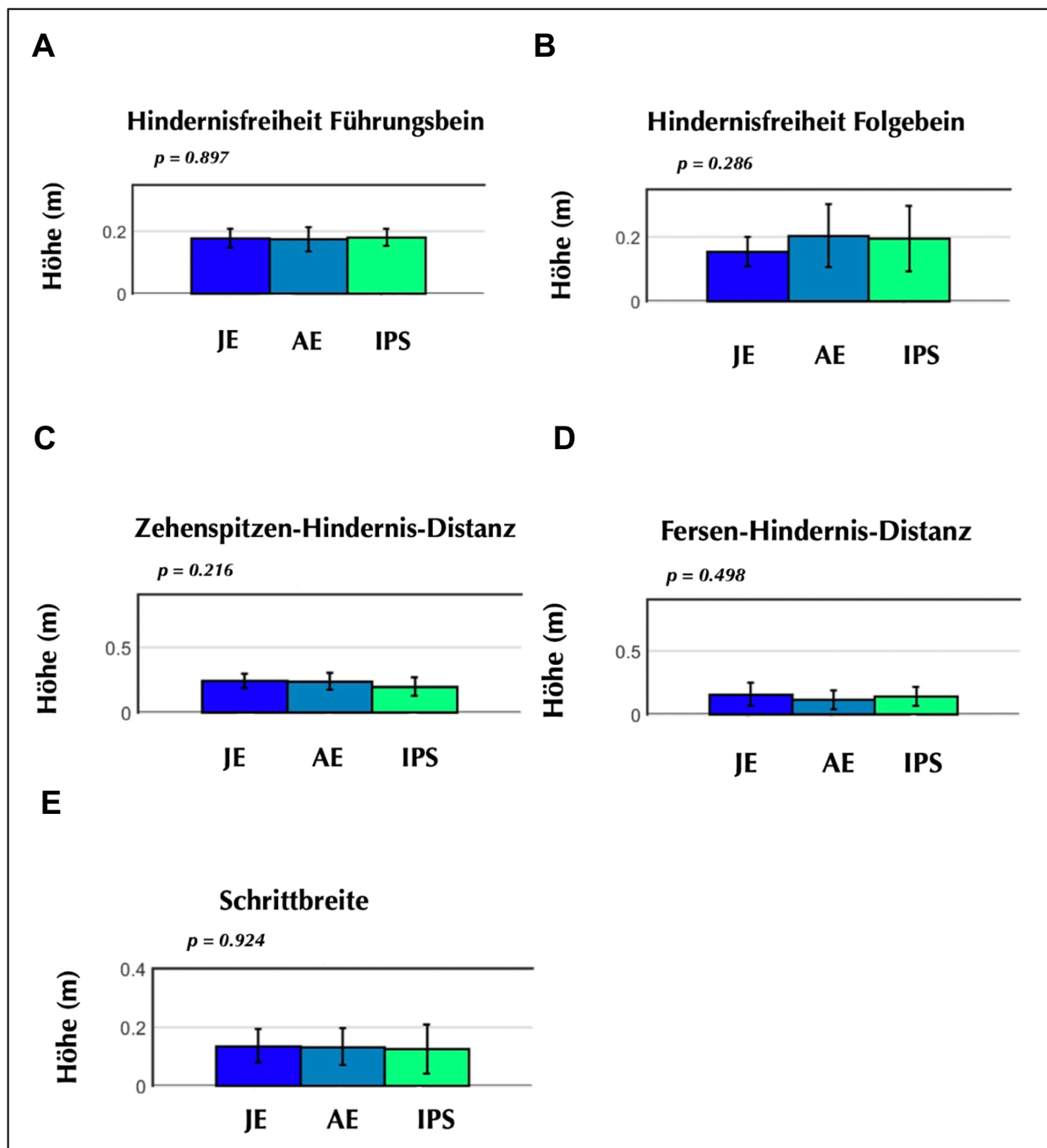


Abbildung 8: Vergleich räumlich-zeitlicher Gangparameter zwischen den drei Kohorten für das 20 cm hohe Hindernis. AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene.

Mithilfe der Varianzanalyse wurden die Parameter zwischen den drei Kohorten verglichen und die entsprechenden P-Werte berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt.

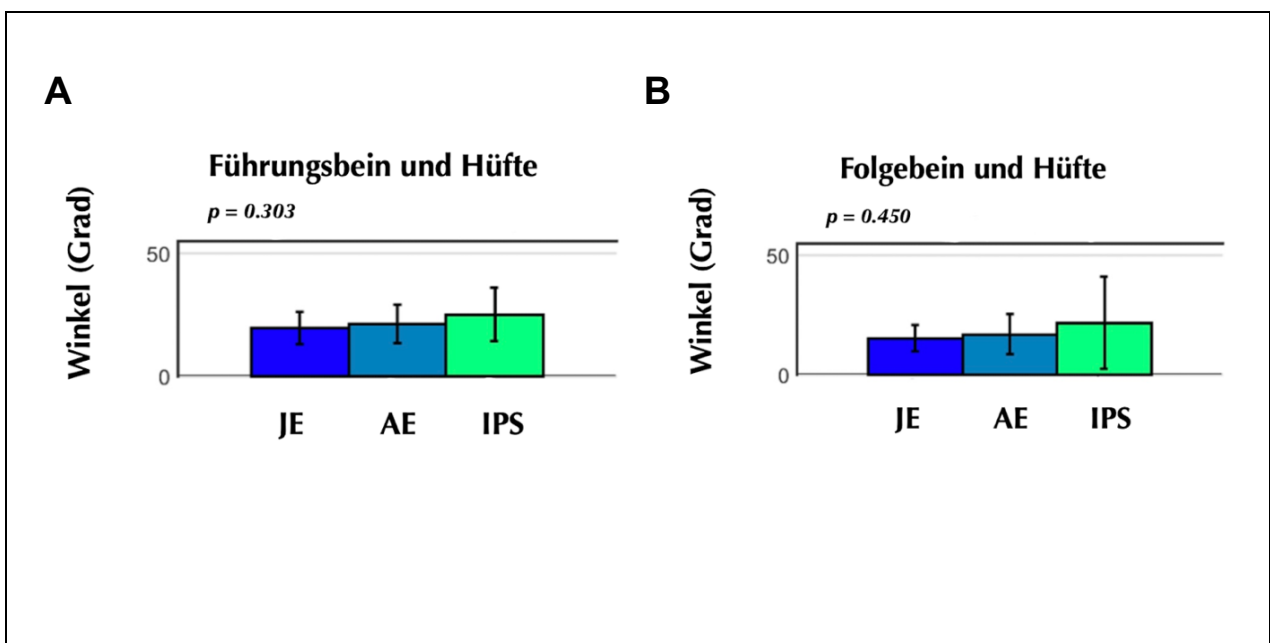
Tabelle 9: P-Werte räumlich-zeitlicher Gangparameter beim Überqueren des 20 cm hohen Hindernisses

Parameter	p-Wert ANOVA
Hindernisfreiheit (Führungsbein)	0.897
Hindernisfreiheit (Folgebein)	0.286
Schrittbreite	0.924
Zehenspitzen-Hindernis-Distanz	0.216
Fersen-Hindernis-Distanz	0.498

ANOVA: Varianzanalyse

3.3.2 Oberkörperstabilität

Bei der Untersuchung der Oberkörperstabilität mithilfe der genannten Winkel in Anwesenheit des 20 cm hohen Hindernisses ergab sich eine Tendenz zu Unterschieden zwischen den drei Kohorten für den Winkel zwischen Folgebein und Brustkorb. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 A-F visualisiert. Wie die Abbildung ebenfalls zeigt, tendierten IPS-Patienten verglichen mit den anderen Kohorten auch für die Winkel zwischen Folgebein und Hüfte sowie zwischen Führungsbein und Brustkorb zu höheren Werten. Für die Winkel zwischen Führungsbein und Hüfte sowie zwischen Hüfte und Brustkorb ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Kohorten.



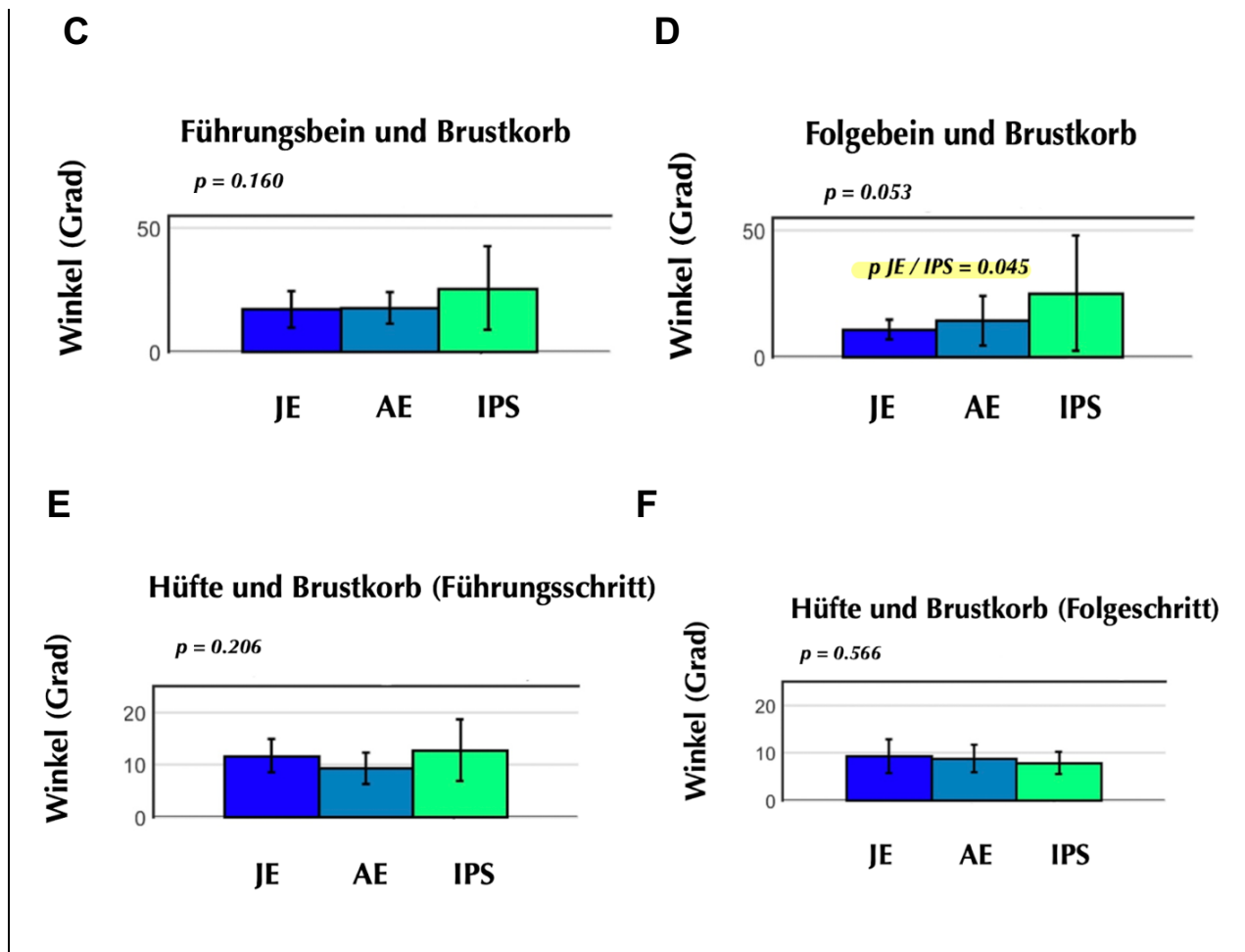


Abbildung 9: Vergleich der Oberkörperstabilität mithilfe von Winkelmessungen verschiedener Körpersegmente zwischen den drei Kohorten für das 10 cm hohe Hindernis. JE: junge Erwachsene; AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; Führungsschritt: Schwungphase, in der sich das Führungsbein über dem Hindernis befindet; Folgeschritt: Phase, in der sich das Folgebein über dem Hindernis befindet.

Die Post Hoc Analyse für den weiteren Vergleich der drei Kohorten ergab, dass IPS-Patienten verglichen mit gesunden jungen Teilnehmern zu einem größeren Winkel zwischen Folgebein und Brustkorb tendierten ($p = 0.045$).

Tabelle 10: P-Werte und Post Hoc Analyse der Oberkörperstabilität beim Überqueren des 20 cm hohen Hindernisses

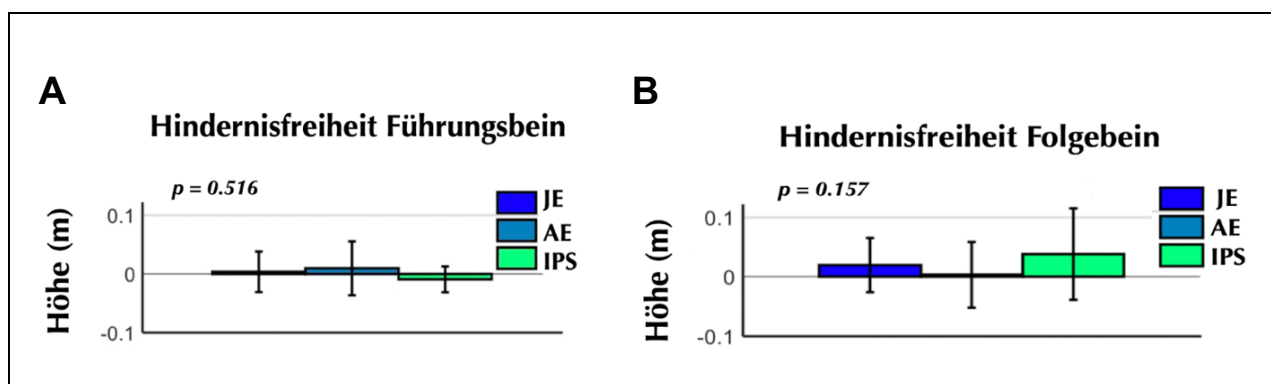
Parameter	p-Wert ANOVA	Post Hoc JE-AE	Post Hoc JE-IPS	Post Hoc AE-IPS
Führungsbein und Hüfte	0.303			
Führungsbein und Brustkorb	0.160			
Hüfte und Brustkorb (Führungsschritt)	0.206			
Folgebein und Hüfte	0.450			
Folgebein und Brustkorb	0.053	0.809	0.045	0.214
Hüfte und Brustkorb (Folgeschritt)	0.566			

AE: Alte Erwachsene; ANOVA: Varianzanalyse; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom, JE: junge Erwachsene.

3.4 Vergleich der Anpassung räumlich-zeitlicher Gangparameter und der Oberkörperstabilität an die Zunahme der Hindernishöhe

3.4.1 Räumlich-zeitliche Gangparameter

Im Anschluss wurde die Anpassung des motorischen Verhaltens aller drei Kohorten an die Veränderung der Hindernishöhe verglichen. Für die Anpassung der Hindernisfreiheiten, der Zehenspitzen-Hindernis-Distanz, der Fersen-Hindernis-Distanz und der Schrittbreite ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Kohorten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 A-E dargestellt.



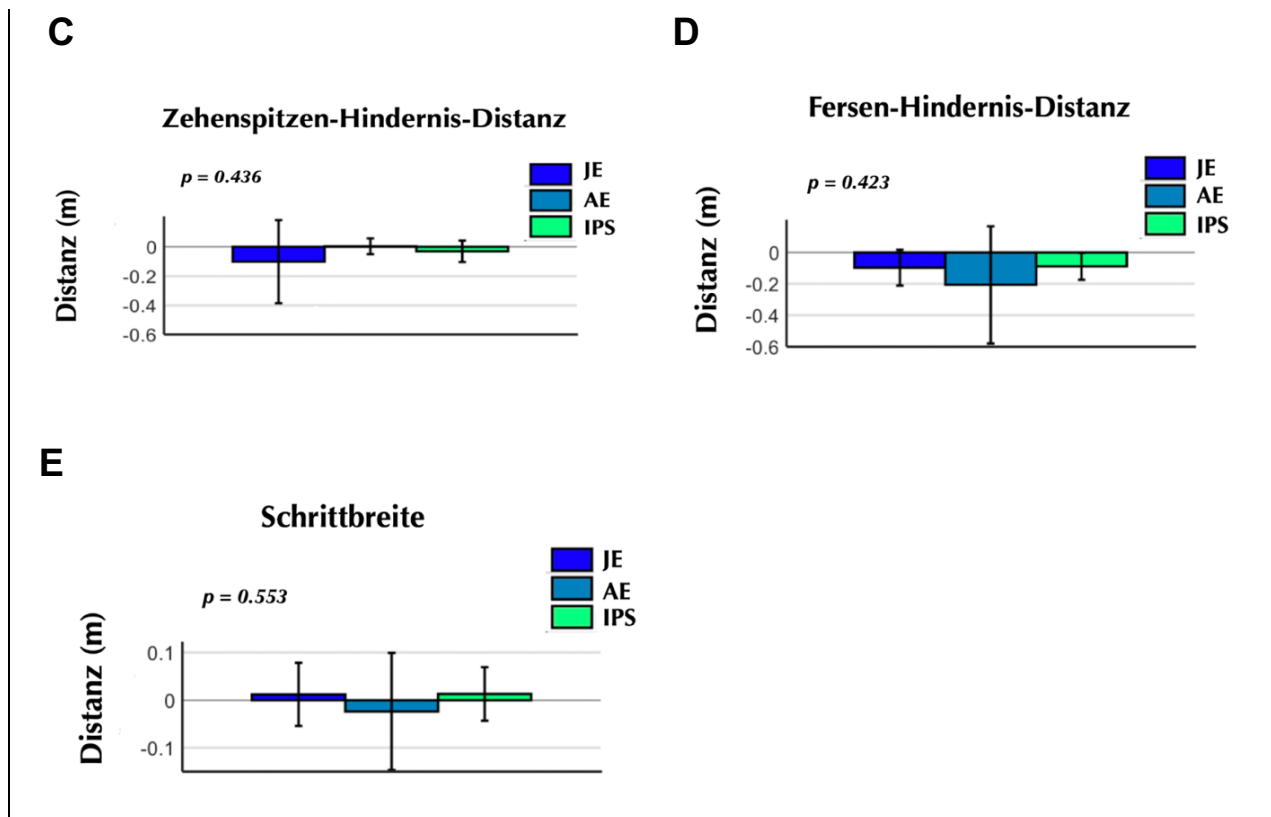


Abbildung 10: Vergleich der Adaptation räumlich-zeitlicher Gangparameter an die Hindernishöhe zwischen den drei Kohorten. AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene.

Mithilfe der Varianzanalyse wurden die Parameter zwischen den drei Kohorten verglichen und die entsprechenden P-Werte berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: P-Werte für den Vergleich der Anpassung räumlich-zeitlicher Gangparameter zwischen den drei Kohorten in Abhängigkeit von der Hindernishöhe

Parameter	p-Wert ANOVA
Hindernisfreiheit (Führungsbein)	0.516
Hindernisfreiheit (Folgebein)	0.157
Schrittbreite	0.553
Zehenspitzen-Hindernis-Distanz	0.436
Fersen-Hindernis-Distanz	0.423

ANOVA: Varianzanalyse

3.4.2 Oberkörperstabilität

Der Vergleich der Anpassung der Oberkörperstabilität an die veränderte Hindernishöhe zwischen den drei Kohorten erbrachte keine signifikanten Unterschiede. Die Winkel zwischen Führungsbein und Hüfte zwischen Führungsbein und Brustkorb, zwischen Hüfte und Brustbein bei Führungsschritt und Folgeschritt sowie zwischen Folgebein und Hüfte und Folgebein und Brustkorb konnten von allen Teilnehmern in gleichem Maße an die Veränderung der Hindernishöhe angepasst werden. Der Vergleich ist in Abbildung 11 A-F abgebildet.

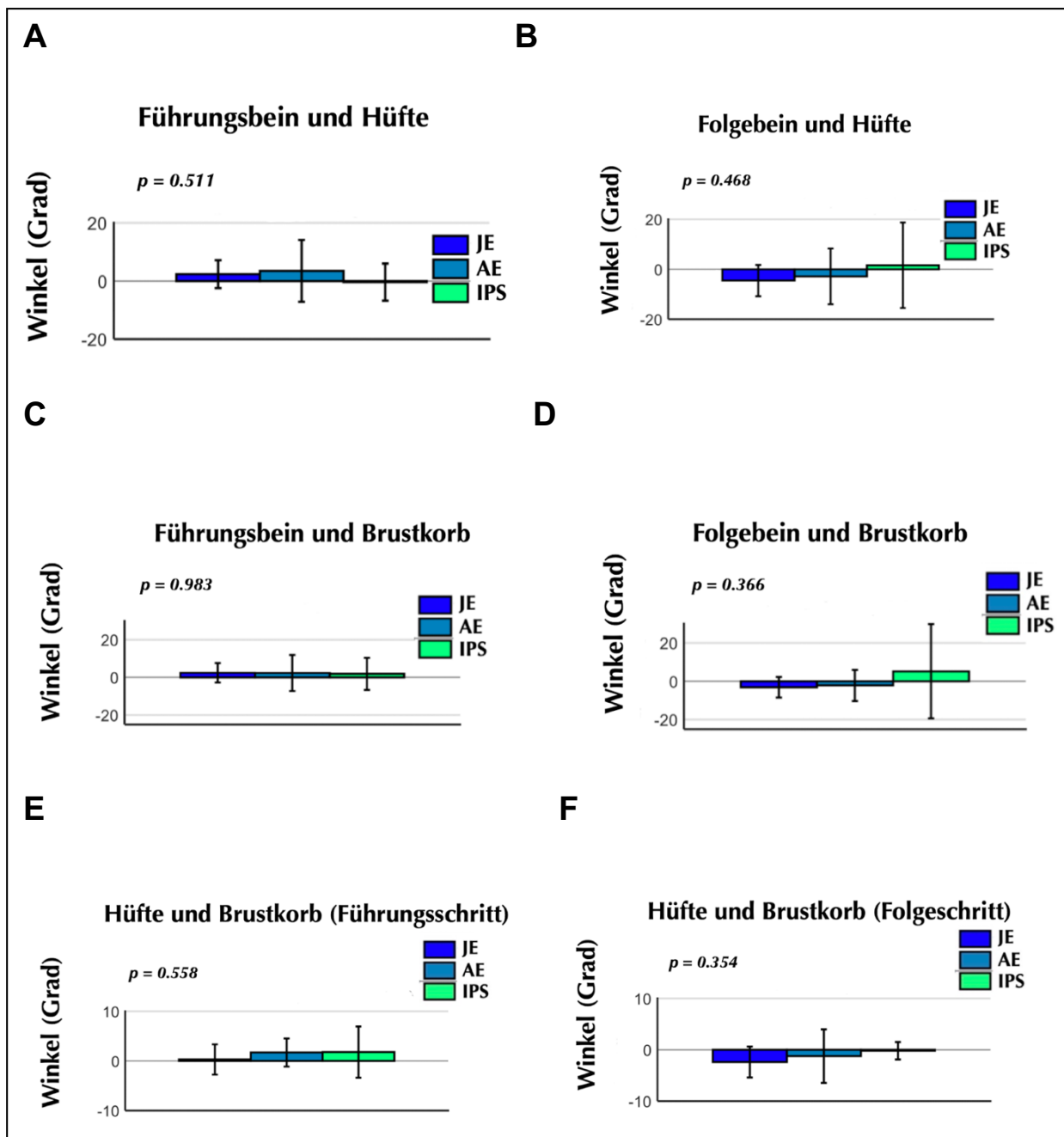


Abbildung 11: Vergleich der Adaptation der Oberkörperstabilität an die Hindernishöhe zwischen den drei Kohorten. AE: alte Erwachsene; Führungsschritt: Schwungphase, in der sich das Führungsbein über dem Hindernis befindet; Folgeschritt: Phase, in der sich das Folgebein über dem Hindernis befindet; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene.

Mithilfe der Varianzanalyse wurden die Parameter zwischen den drei Kohorten verglichen und die entsprechenden P-Werte berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: P-Werte für den Vergleich der Anpassung der Oberkörperstabilität zwischen den drei Kohorten in Abhängigkeit von der Hindernishöhe

Parameter	p-Wert ANOVA
Führungsbein und Hüfte	0,511
Führungsbein und Brustkorb	0,983
Hüfte und Brustkorb (Führungsschritt)	0,558
Folgebein und Hüfte	0,468
Folgebein und Brustkorb	0,366
Hüfte und Brustkorb (Folgeschritt)	0,354

3.5 Zusammenhang zwischen Sturzanamnese und gemessenen Parametern

Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigten einen Zusammenhang zwischen einer positiven Sturzanamnese und der Hindernisfreiheit des Führungsbeins beim Überqueren des niedrigen Hindernisses (Tabelle 13). Die Subanalyse zeigte, dass das Ergebnis durch IPS-Patienten getrieben wurde (Tabelle 14). Für sie ergab sich ein positiver Zusammenhang zwischen der Hindernisfreiheit und der Anzahl von Stürzen, d.h., je mehr Stürze die Personen hatten, desto mehr Hindernisfreiheit zeigte das Führungsbein. Zwischen weiteren klinischen Parametern und einer positiven Sturzanamnese ließen sich keine signifikanten Zusammenhänge feststellen.

Tabelle 13: Korrelation zwischen Sturzrate und Hindernisfreiheit für alle Kohorten zusammen

Variable	Hindernis- freiheit Führungs- bein (10 cm Hindernis)	Hindernisfrei- heit Führungsbein (20 cm Hindernis)	Hindernisfreiheit Folgebein (10 cm Hindernis)	Hindernisfrei- heit Folgebein (20 cm Hindernis)
Sturzrate	0.02	0.24	0.41	0.97
p-Wert	0	3	4	6
Korrelatio- ns- Koeffizient	0.408	0.212	0.149	-0.005

Tabelle 14: Zusammenhang zwischen Sturzrate und demographischen Daten sowie Sturzrate und räumlich-zeitlichen Gangparametern dargestellt mithilfe der Rangkorrelation nach Spearman für die einzelnen Gruppen

Variable		Sturzrate		
		JE	AE	IPS
Gewicht [kg]	Spearman's rho	0.203	-0.091	0.036
	p-Wert	0.487	0.815	0.927
MoCA	Spearman's rho	-0.118	-0.138	0.278
	p-Wert	0.702	0.724	0.504
MDS-UPDRS	Spearman's rho	-0.166	0.093	0.076
	p-Wert	0.570	0.811	0.846
Hindernisfreiheit Führungsbein (nH)	Spearman's rho	0.051	0.548	0.757
	p-Wert	0.864	0.127	0.018
Hindernisfreiheit Führungsbein (hH)	Spearman's rho	0.101	0.091	0.392
	p-Wert	0.730	0.815	0.297

Hindernisfreiheit (nH)	Folgebein	Spearman's rho	-0.304	0.548	-0.169
		p-Wert	0.291	0.127	0.663
Hindernisfreiheit (hH)	Folgebein	Spearman's rho	-0.152	0.183	-0.134
		p-Wert	0.604	0.638	0.732
Schrittbreite (nH)		Spearman's rho	0.253	-0.365	-0.356
		p-Wert	0.382	0.334	0.347
Schrittbreite (hH)		Spearman's rho	0.354	0.091	-0.223
		p-Wert	0.214	0.815	0.565
Zehenspitzen-Hindernis-Distanz (nH)		Spearman's rho	0.203	-0.091	-0.169
		p-Wert	0.487	0.815	0.663
Zehenspitzen-Hindernis-Distanz (hH)		Spearman's rho	0.203	0.456	-0.267
		p-Wert	0.487	0.217	0.487
Fersen-Hindernis-Distanz (nH)		Spearman's rho	0.101	0.274	-0.347
		p-Wert	0.730	0.476	0.360
Fersen-Hindernis-Distanz (hH)		Spearman's rho	-0.304	-0.456	-0.374
		p-Wert	0.291	0.217	0.321

nH: niedriges Hindernis; hH: hohes Hindernis; Spearman's rho: Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman. Signifikante Zusammenhänge hervorgehoben; JE: Junge Erwachsene; AE: Alte Erwachsene; IPS: Idiopathisches Parkinsonsyndrom

4 Diskussion

Das IPS ist klinisch durch ein breites Spektrum an motorischen und nicht-motorischen Defiziten gekennzeichnet [26]. Die Erkrankung hat einen chronisch-progredienten Charakter und die Symptome sprechen mit zunehmender Erkrankungsdauer immer schlechter auf die dopaminerge Therapie an [126]. Es kommt folglich zu Einschränkungen der Motorik mit Gleichgewichtsstörungen, erhöhtem Sturzrisiko und letztlich oft zu Immobilität und sozialer Isolation [26]. Aber auch gesunde Menschen erleben mit zunehmendem Alter oft eine Abnahme motorischer und kognitiver Fähigkeiten, die eine adäquate Gleichgewichtskontrolle erschweren und das Sturzrisiko erhöhen [198]. Bei gesunden Älteren und IPS-Patienten zählen Stürze zu den Hauptursachen einer reduzierten Lebensqualität sowie einer Zunahme von Hospitalisierung und Mortalität [77] [72] [199]. Hindernisse im Alltag wie das Gehen über Bordsteinkanten oder das Betreten der Badewanne sind häufige Ausgangspunkte dieser Ereignisse [200]. Daher ist ein genaues Verständnis für das Verhalten der gefährdeten Menschen in Anwesenheit von Hindernissen diagnostisch und therapeutisch von großer Bedeutung.

Die vorliegende Studie untersuchte den Effekt des physiologischen Alterungsprozesses und des IPS auf klinische Gangparameter, die Kontrolle des Oberkörpers sowie den Zusammengang zwischen gemessenen Parametern und positiver Sturzanamnese beim Überwinden von Hindernissen zwei verschiedener Höhen. Mithilfe einer optischen 3D Analyse konnten die genauen Bein- und Oberkörperbewegungen der Studienteilnehmer detektiert werden. Dabei war die Hindernisfreiheit die Distanz zwischen Fuß und Hindernis in der vertikalen Ebene. Sie sagt also aus, wie hoch die Teilnehmer ihre Beine über die Hindernisse heben. Je geringer die Hindernisfreiheit, desto höher ist vermutlich das Risiko für einen unerwarteten Hinderniskontakt. Menschen mit motorischen Defiziten sind dann aufgrund defizienter Kompensationsmechanismen vermutlich besonders sturzgefährdet [167]. Weitere Parameter die untersucht wurden, sind die Fuß-Hindernis-Abstände vor und hinter dem Hindernis, also beim Abheben und beim Aufkommen der Füße. Die Schrittbreite hat ebenfalls einen Einfluss auf die Gleichgewichtskontrolle. Ein breites Schrittmuster erhöht die Unterstützungsfläche und erleichtert dadurch die Ausgleichbewegungen auf mögliche Gleichgewichtsverluste [167]. Neben den räumlich-zeitlichen Parametern wurden die Winkel zwischen Füßen und Hüfte, zwischen Füßen und Thorax, sowie zwischen Hüfte und Thorax gemessen. Die Winkel zwischen den Körpersegmenten sollten Informationen über das Bewegungsausmaß des Oberkörpers und die Körperstabilität liefern. Weiterhin wurde der Zusammenhang zwischen bereits aufgetretenen Stürzen in der Anamnese und den räumlich-

zeitlichen Gangparametern analysiert, um mögliche Kausalitätsfaktoren eines erhöhten Sturzrisiko zu entdecken.

4.1 Effekt des hohen Alters und des IPS auf räumlich-zeitliche Gangparameter und die Oberkörperstabilität beim Überwinden des 10 cm hohen Hindernisses

4.1.1 Hindernisfreiheit

Alle IPS-Patienten absolvierten die Überquerung des 10 cm hohen Hindernisses erfolgreich ohne Hinderniskontakt und ohne signifikante Auffälligkeiten der Gangparameter. Sie passten also ihr Verhalten an die veränderten motorischen Herausforderungen offensichtlich adäquat an und erreichten eine ausreichende Hindernisfreiheit. Aufgrund der unveränderten Hindernisfreiheit von IPS-Patienten verglichen mit gesunden älteren Teilnehmern kann der erste Teil dieser Hypothese nicht bestätigt werden. Die resultierenden Ergebnisse lassen vermuten, dass die Hindernisse den IPS-Patienten als eine Art Stimulus gedient haben. Beim „sensory cueing“ nutzen IPS-Patienten Gegenstände auf Ihrer Gehstrecke, um Bewegungen zu initiieren und ein plötzliches Erstarren des Körpers zu verhindern. Die Degeneration dopaminerger Neurone führt zur Reduktion phasischer Impulse der Basalganglien an zahlreiche kortikale und subkortikale Hirnareale und dadurch zum klinischen Bild der verlangsamten Bewegung [201]. Zahlreiche Studien haben bereits eine Verbesserung dieser Hypokinese mithilfe sensorischer Reize nachweisen können. So kann durch Aufbringen von Streifen auf dem Boden die Ganggeschwindigkeit erhöht werden [202]. Unklar ist jedoch, bis zu welcher Höhe bzw. welchem Schwierigkeitsgrad der Hindernisse das „sensory cueing“ als Kompensationsmechanismus genutzt werden kann. Denkbar ist zudem, dass die Ganghypokinese erst in späteren Stadien der Erkrankung zu einer Verminderung der Hindernisfreiheit führt und das Risiko für einen unerwarteten Kontakt erhöht. Der chronisch-progrediente Verlauf des IPS könnte dazu führen, dass die motorischen Defizite und insbesondere die Hypokinese in späteren Stadien der Erkrankung nicht kompensiert werden können. Ein weiterer Erklärungsansatz für die mit Kontrollen vergleichbare Hindernisfreiheit der hier untersuchten IPS-Patienten ist die zu erwartende gute medikamentöse Einstellung zum Zeitpunkt der Messung. Die Probanden der hier beschriebenen Studie wurden engmaschig vom klinischen Personal betreut und vom Promovenden immer zur gleichen Zeit nach Einnahme der Medikamente untersucht. Dies sollte in zukünftigen Studien detailliert untersucht werden, insbesondere ob medikamentöse OFF-Zustände zu einer Veränderung der Hindernisbewältigung führen. Ebenfalls möglich ist, dass IPS-Patienten zur Kompensation ihrer sensorischen Defizite den Blick vermehrt in Richtung Hindernis gerichtet haben und

dadurch eine größere Hindernisfreiheit erreichen konnten. So konnte bereits gezeigt werden, dass sie vermehrt auf visuelle Informationen angewiesen sind und den Blick längere Zeit auf den Boden richten [203]. Für die Entstehung der großen Distanz zwischen Füßen und Hindernis in der vertikalen Ebene bzw. der fehlenden Abnahme der Hindernisfreiheit aufgrund IPS-spezifischer Defizite sind weiterhin psychische Einflussfaktoren in Betracht zu ziehen. Es besteht die Evidenz, dass sowohl ein höheres Lebensalter, als auch das IPS mit einer vermehrten Angst vor Stürzen einhergehen [154] [160]. Dadurch entsteht das Bedürfnis, Hindernisse mit einem möglichst großen Sicherheitsabstand zu überqueren. Diese emotionale Komponente ist von großer Bedeutung für Gangbild, Sturzrisiko und soziale Unabhängigkeit im Alltag. Dabei ist zu bedenken, dass die Sturzangst ohne Anwesenheit der Studienleiter und diverser Instruktionen vermutlich noch stärkere Auswirkungen auf das motorische Verhalten der Probanden gezeigt hätte. Wie erwähnt, waren die Hindernisse dieser Studie so installiert, dass sie bei Berührung umgefallen wären und so keinen relevanten Widerstand geboten hätten, um die Verletzungsgefahr zu reduzieren. Ein stabiles Hindernis hätte eine möglicherweise vorhandene Sturzangst und deren Einfluss auf die Hindernisfreiheit noch verstärken können. Aufgrund der adäquaten Hindernisfreiheit waren die Studienprobanden keinem erhöhten Risiko für unerwartete Hinderniskontakte und folgende Stürze ausgesetzt. Dennoch muss das Verhalten der IPS-Patienten hinsichtlich des Sturzrisikos vorsichtig interpretiert werden. Eine große Hindernisfreiheit führt zu einer Verlängerung der Schwungphase des Gangzyklus. Dadurch verbringen die Patienten mehr Zeit in der instabilen Einzelstandphase [174]. In dieser Phase des Gangzyklus ist das Gleichgewicht besonders vulnerabel gegenüber externen Störfaktoren und es kommt zu einer stärkeren Belastung der Hüft- und Beinmuskulatur [154]. IPS-spezifische Defizite wie die posturale Instabilität und die vorzeitige Abnahme der Muskelkraft sorgen dafür, dass eine verlängerte Einzelstandphase über dem Hindernis für IPS-Patienten besonders gefährlich sind und das Sturzrisiko erhöhen [167]. Die unveränderte Hindernisfreiheit von IPS-Patienten im Vergleich zu gesunden jungen Probanden könnte aus einer Angst vor Stürzen hervorgehen und einen negativen Einfluss auf die Gleichgewichtskontrolle haben.

Studien mit Blick auf die Hindernisfreiheit von IPS-Patienten konnten bislang keine einheitlichen Ergebnisse liefern. Galna et al. [174] untersuchten ebenfalls Gangparameter von IPS-Patienten beim Überwinden von Hindernissen und stellten im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe keine signifikanten Unterschiede fest. Die Autoren schlossen daraus, dass IPS-Patienten möglicherweise eher Schwierigkeiten beim Erreichen einer ausreichenden Schrittlänge aufweisen. Die Verfasser vermuteten ebenfalls, dass IPS-Patienten das Hindernis als Hilfestellung (also auch als „sensory cue“) verwenden, um eine ausreichend hohe Hindernisfreiheit zu erlangen. IPS-Patienten in Hindernisuntersuchungen von Stegemöller et

al. [154] überquerten Hindernisse im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ebenfalls ohne signifikante Veränderung der Hindernisfreiheit. Eine weitere Studie untersuchte das Verhalten von IPS-Patienten beim Gehen über ebene Flächen. Ziel der Studie war die Fußfreiheit, also das Anheben der Beine in der Schwungphase des Gangzyklus. Die Ergebnisse zeigten, dass die Fußfreiheit erst in späteren Stadien der Erkrankung verändert zu sein scheint [48]. Wie bereits erwähnt, ist eine deutlichere Veränderung der Hindernisfreiheit in späteren Erkrankungsstadien denkbar. Diese Vermutung wird auch durch Ergebnisse von Vitório et al. [175] unterstützt, die eine Abnahme der Hindernisfreiheit bei Patienten in moderaten Stadien zeigte, während Patienten mit einem milden IPS unveränderte Parameter gegenüber Kontrollen aufwiesen. Auch der Schwierigkeitsgrad der Hindernisse ist in die Interpretation mit einzubeziehen. So konnte beobachtet werden, dass sich die Hindernisfreiheit von IPS-Patienten in Anwesenheit von zwei aufeinanderfolgenden Hindernissen im Vergleich zur Kontrollgruppe reduzierte [188]. Zwei Hindernisse erfordern eine noch komplexere kognitive Planung der Motorik. Denkbar ist, dass IPS-Patienten die Motorik durch zu hohe geistige Anforderungen vernachlässigen und die Hypokinese nicht mehr kompensieren können. Weiterhin ist es möglich, dass die Muskelkraft, die beim IPS wie bereits erwähnt reduziert ist, nicht mehr für eine adäquate Hindernisfreiheit ausreicht. Auch ein Effekt von L-Dopa auf die Hindernisfreiheit konnte nachgewiesen werden [204]: Es zeigte sich im On-Status eine Zunahme der Hindernisfreiheit. Aufgrund des chronisch-progredienten Verlaufs der Erkrankung und des damit oft einhergehenden reduzierten Ansprechens der dopaminergen Medikation [126] sind weitere Untersuchungen der Effektivität dieser Medikamente von großer Bedeutung für zukünftige Therapieschritte. Während eine zu geringe Hindernisfreiheit das Risiko erhöht, durch einen unerwarteten Kontakt zu stolpern, könnte eine zu große Hindernisfreiheit das Sturzrisiko durch Einflüsse auf die Gleichgewichtskontrolle erhöhen [154] [48]. Möglicherweise ist die Angst vor Stürzen in frühen Stadien der Erkrankung ein ausreichender Trigger für eine große Hindernisfreiheit, während in späteren Stadien die Abnahme der Muskelkraft und die Hypokinese zu einer Abnahme der Hindernisfreiheit führt. Es sind weitere Untersuchungen notwendig, um den Einfluss des IPS auf die Hindernisfreiheit auch in späteren Stadien der Erkrankung besser zu verstehen. Da die Hindernisfreiheit in frühen Stadien der Erkrankung aufrechterhalten werden kann, sollten Krafttraining und Balance Übungen noch stärker in den Fokus therapeutischer Maßnahmen rücken. So könnte dem Sturzrisiko während der instabilen Einzelstandphase entgegengewirkt werden.

Entgegen der aufgestellten Hypothese zeigten sich auch bei gesunden älteren Menschen keine signifikanten Unterschiede der räumlich-zeitlichen Parameter im Vergleich zu gesunden jungen Probanden. Vermutlich reichte die Muskelkraft der untersuchten Probanden aus, um eine adäquate Hindernisfreiheit zu erreichen. Auch für gesunde ältere Menschen konnte

bereits ein vermehrter Blick in Richtung Hindernis als möglicher Kompensationsmechanismus gezeigt werden, der von Muir et al. [168] als Kompensationsmechanismus interpretiert wurde. Möglicherweise konnten die Probanden ihre Gangparameter dadurch anpassen. Interessanterweise tendierte die Hindernisfreiheit dieser Kohorte verglichen mit gesunden jungen Teilnehmern deutlich in Richtung einer größeren Hindernisfreiheit ($p = 0.057$). Der physiologische Alterungsprozess geht mit einer Abnahme visueller, kognitiver [205] und propriozeptiver [206] Fähigkeiten einher. Dies könnte zu einer mangelnden Präzision in der Bewegungsausführung führen und dadurch einen großen Abstand zwischen Fuß und Hindernis in der vertikalen Ebene erklären. Die Angst vor Stürzen betrifft viele Menschen im höheren Lebensalter und führt zu psychischen und physischen Beeinträchtigungen [207]. Eine Zunahme der Hindernisfreiheit ist als Folge eines erhöhten Bedürfnisses nach Sicherheit denkbar und könnte dadurch das Verhalten ebenfalls erklären. Wie bereits erwähnt, geht eine große Hindernisfreiheit jedoch mit einer Zunahme der instabilen Einzelstandphase einher. Der längere Verbleib in dieser Phase des Gangzyklus bedeutet immer eine stärkere Belastung für Hüftmuskulatur und Körperstabilität, sodass das Verhalten zwar die Wahrscheinlichkeit eines unerwarteten Hinderniskontakts vermindert, jedoch durch Beeinträchtigung der Gleichgewichtskontrolle das Sturzrisiko erhöht. Klinische Gangparameter im höheren Lebensalter wurden in vergangenen Studien detailliert beschrieben. Untersuchungen von Lowrey et al. [167] und Chen et al. [150] konnten ebenfalls keine signifikanten Auffälligkeiten der Hindernisfreiheit älterer Menschen nachweisen. Lowrey et al. [167] untersuchten dabei sogar das Verhalten in Anwesenheit zweier Hindernisse und konnten keine wesentliche Kompromittierung des Gangbildes feststellen. Muir et al. [168] stellten in Ihren Untersuchungen eine größere Hindernisfreiheit bei älteren Probanden fest und untersuchten dabei den Einfluss dieses Verhaltens auf die gesamte Körperstabilität. Sie beschreiben aktive Strategien im Verhalten älterer Menschen zur Aufrechterhaltung einer größeren Hindernisfreiheit, die jedoch mit verstärkten Schwankungen des Oberkörpers einhergehen und das Gleichgewicht beeinträchtigen. Die Untersuchungen bestätigen daher die aufgestellte Vermutung, dass die sichtliche Tendenz in Richtung einer größeren Hindernisfreiheit als riskantes Verhalten interpretiert werden kann. Um das Sturzrisiko zu reduzieren könnten daher auch bei gesunden Älteren ein propriozeptives Training sowie Kraft- und Gleichgewichtsübungen wichtig sein, um die präzise Koordination der unteren Extremität zu verbessern und das Sturzrisiko zu senken. Um herauszufinden, ab wann die Muskelkraft nicht mehr für eine adäquate Hindernisfreiheit ausreicht, sind weitere Studien mit Vergleich mehrerer Altersklassen notwendig.

4.1.2 Horizontale Fuß-Hindernis-Distanzen

Die horizontalen Abstände zwischen Füßen und Hindernissen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Kohorten. Da bereits hinreichende Evidenz besteht, dass IPS-Patienten aufgrund der Hypokinese ein kleinschrittiges Gangbild haben [189], war die erste Hypothese, dass es beim IPS zu einer Abnahme der horizontalen Abstände vor und hinter den Hindernissen kommt. Dieser Teil der Hypothese lässt sich jedoch nicht bestätigen. IPS-Patienten unterscheiden sich nicht signifikant von den Kontrollgruppen, was nahelegt, dass diese Gruppe, ein kurzschrittiges Gangbild vorausgesetzt, ihre Schrittlänge über den Hindernissen vergrößern können. Auch hier sind das „sensory cueing“ und der vermehrte Blick in Richtung Hindernis als mögliche Kompensationsmechanismen in Betracht zu ziehen. Das Hindernis könnte ihnen als Hilfe dienen, um die Bewegungsarmut zu überwinden und die Schrittlänge zu vergrößern. Diese Vermutung lässt sich durch die Ergebnisse von Jacobs et al. [208] unterstützen, die eine Zunahme der Schrittlänge durch den vermehrten Blick in Richtung des Hindernisses nachweisen konnten. Allerdings zeigte sich ein Rückgang dieses kompensatorischen Verhaltens mit zunehmender Krankheitsdauer. Eine zunehmende Veränderung der horizontalen Parameter bei Zunahme der Hypokinese mit Fortschreiten der Erkrankung ist ebenfalls denkbar. Die ausreichende Distanz zwischen Zehenspitzen und Hindernis vor dem Abheben des Schwungbeins spricht für die Robustheit des Parameters. So ist die Positionierung vor dem Hindernis besonders wichtig, um eine adäquate Hindernisfreiheit erreichen zu können [168]. Durch eine starke Fokussierung kann die stabile Fußposition vor dem Hindernis dann trotz Fortschreiten der Erkrankung lange aufrechterhalten werden. Zwischen den beiden genannten Kohorten zeigte sich zwar kein signifikanter Unterschied der horizontalen Fuß-Hindernis-Abstände, dennoch lässt Abbildung 6 A und B eine Reduktion der Abstände sowohl zwischen Zehenspitzen und Hindernis, als auch zwischen Ferse und Hindernis erkennen. Dies könnte durch Abnahme der Schrittlänge als Folge der Hypokinese erklärt werden. Zudem kann eine reduzierte Fersen-Hindernis-Distanz als Kompensationsmechanismus interpretiert werden. Demnach positionieren IPS-Patienten ihren Fuß so nah wie möglich hinter dem Hindernis, um die Dauer der instabilen Einzelstandphase zu reduzieren [154]. Wenn sich die instabile Phase des Gangzyklus verringert, ist von einer stabileren Körperhaltung auszugehen. Eine geringe Distanz zwischen Zehenspitzen und Hindernis kurz vor dem Abheben der Beine könnte ebenfalls Folge eines erhöhten Sicherheitsbedürfnisses sein. Die Ergebnisse der horizontalen Fuß-Hindernis-Abstände von IPS-Patienten bisheriger Studien sind ebenfalls nicht eindeutig. Galna et al. [174] konnten keine signifikanten Veränderungen der Schrittlänge durch das IPS feststellen. Sie interpretieren das Verhalten jedoch als riskant, da die Patienten ihr Bein zur Kompensation der kleineren Schrittlänge näher vor dem Hindernis positionieren müssten, und seien daher

einem erhöhten Risiko für Hinderniskontakte ausgesetzt. Nach Chou et al. [209] führt ein näheres Herantreten an das Hindernis jedoch zu Einschränkungen der Hüft-, Knie- und Sprunggelenksbeugung und erhöht dadurch das Sturzrisiko. In Untersuchungen von Stegemöller et al. [154] positionierten IPS-Patienten ihren Fuß im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant näher vor dem Hindernis. Sie interpretieren die Reduktion der horizontalen Distanz in Kombination mit einer Zunahme der Hindernisfreiheit als vorsichtiges Verhalten. Dieses sei die Folge der Sturzangst. Vitorio et al. [175] konnten zudem einen Zusammenhang zwischen horizontalen Parametern und Schweregrad der motorischen Symptomatik feststellen. Während Patienten mit mildem IPS keine Auffälligkeiten zeigten, positionieren IPS-Patienten mit moderatem IPS den Fuß näher hinter dem Hindernis. Dies spricht für die Abnahme der Schrittlänge als Folge der Hypokinese, wodurch IPS-Patienten in fortgeschrittenen Stadien gefährdet sind, das Hindernis beim Aufkommen der Füße mit der Ferse zu berühren. Trotz fehlender Signifikanz lassen sich Beobachtungen der vorliegenden Studie, wie sie in der genannten Graphik zu sehen sind, mit den Ergebnissen vergangener Studien vereinbaren. Weitere Studien mit Probanden in höherem Lebensalter und mit höheren Hindernissen könnten die Erkenntnisse bestätigen. Wie bereits von Galna et al. [174] postuliert, könnte die Zunahme der Schrittlänge als integrativer Bestandteil der IPS-Therapie von großer Bedeutung sein. Die Untersuchung der Kopfneigung während der Hindernisüberwindung könnte zeigen, ob IPS-Patienten vermehrt in Richtung Hindernis blicken müssen und ob dieses Verhalten durch reduzierte Wahrnehmung der Umgebung das Sturzrisiko erhöht.

Wie bereits in der Literatur beschrieben, kommt es mit zunehmendem Alter zur Abnahme der Ganggeschwindigkeit und zur Reduktion der Schrittlänge [144]. Langsamere Bewegungen ermöglichen mehr Zeit, um die Bewegungen der Beine zu koordinieren und die Beine richtig zu positionieren. Die abrupten Bewegungen des Oberkörpers über dem Hindernis nehmen ab und erleichtern die Gleichgewichtskontrolle. Daher wird das Verhalten älterer Menschen beim Überqueren von Hindernissen häufig als vorsichtige Strategie bezeichnet [210]. Die kleine Schrittlänge wirkt sich jedoch auf die Distanzen zwischen Füßen und Hindernis in der horizontalen Ebene aus. Eine reduzierte Schrittlänge über Hindernissen scheint das Risiko zu erhöhen, durch unerwartete Berührungen zu stolpern [211]. Ergebnisse dieser Studie lassen vermuten, dass die Schrittlänge erst im höheren Alter so stark eingeschränkt ist, dass die Füße sowohl vor, als auch hinter den Hindernissen mit geringeren Abständen positioniert werden und die Gefahr für einen Hinderniskontakt erhöhen. Die gesunde ältere Kohorte zeigte im Vergleich zur gesunden jungen Kohorte keine Unterschiede der horizontalen Distanzen. Die Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung der Hypokinese beim IPS als mögliche Ursache der Reduktion horizontaler Fuß-Hindernis-Distanzen. Wie bereits erwähnt und auch von Muir et al. [168] analysiert, könnte die große Bedeutung der Distanz vor den Hindernissen für eine

sichere Überquerung die Robustheit dieses Parameters erklären. Wie Graphik 6 ebenfalls erkennen lässt, nimmt die Zehenspitzen-Hindernis-Distanz im Vergleich zur gesunden jungen Kohorte ab, während die Fersen-Hindernis-Distanz vergleichsweise zunimmt. Dies könnte ebenfalls für einen hohen Sicherheitsbedarf älterer Menschen sprechen, die noch ausreichend Muskelkraft besitzen, um das Hindernis mit großen Schritten zu überqueren. Während die Fersen-Hindernis-Distanz in vergangenen Studien oft als reduziert dargestellt wurde, verhält sich die Zehenspitzen-Hindernis-Distanz nicht ganz einheitlich. Weerdesteijn et al. [192] beobachteten kleinere Werte im Verhalten älterer Menschen für beide Parameter. Chen et al. [150] berichten ebenfalls von einer geringeren horizontalen Distanz hinter dem Hindernis, während die horizontale Distanz vor dem Hindernis der gesunden älteren Kohorte größer war. Im Vergleich zur vorliegenden Studie waren die Probanden jedoch deutlich anspruchsvolleren Hindernissen ausgesetzt. Weitere Untersuchungen der horizontalen Fuß-Hindernis-Abstände gesunder Menschen in höherem Lebensalter sind erforderlich, um herauszufinden, ab welchem Alter keine ausreichende Schrittlänge mehr erreicht werden kann und dadurch das Risiko für Hinderniskontakte steigt.

4.1.3 Schrittbreite

Auch für die Schrittbreite zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen IPS-Patienten und gesunden jungen Teilnehmern. Aufgrund von posturaler Instabilität und Gangstörung sind IPS-Patienten insbesondere in herausfordernden Situationen wie dem Gehen über Hindernisse vermutlich einem höheren Sturzrisiko ausgesetzt und auf eine stabile Körperhaltung angewiesen. Durch einen breiten Gang kann die Unterstützungsfläche vergrößert, und den krankheitsbedingten Defiziten entgegengewirkt werden, um mehr Körperstabilität zu gewinnen. Weiterhin wird die schnelle Anpassung an unerwartete Richtungsänderungen des Körperschwerpunktes durch ein breites Gangbild erleichtert, wodurch sich die dynamische Stabilität erhöht [167]. Denkbar ist daher, dass IPS-Patienten ihre Symptome durch einen breiteren Gang kompensieren können. Im Falle eines Hinderniskontaktes reagieren sie mit stärkeren Auslenkungen des Oberkörpers, welche nur mit einer ausreichenden Schrittbreite adäquat eingefangen werden können. Die unveränderte Schrittbreite von IPS-Patienten der vorgelegten Studie kann daher als risikoreiches Verhalten interpretiert werden. Wie Abbildung 6 E zeigt, wird trotz fehlender Signifikanz sogar eher eine vergleichsweise geringe Schrittbreite bei IPS-Patienten deutlich. Ursache für ein enges Schrittmuster bzw. die fehlende Zunahme der Schrittbreite zur Kompensation eingeschränkter Körperstabilität könnte der axiale Rigor als eines der IPS-Leitsymptome [14] sein. Dies könnte zu einer starren Körperhaltung führen und dadurch eine verminderte Beckenbewegung (bei jeder Schwungphase muss dann die andere Seite des Beckens, i.e. der M. glutes medius, das

Becken hochziehen) mit engem Schrittmuster zur Folge haben. Die unterschiedliche Ausprägung dieses Symptoms je nach IPS-Subtyp [212] könnte zudem Unterschiede der Schrittbreite in verschiedenen Studien erklären. Zu bedenken ist ebenfalls eine erhöhte Variabilität der Schrittbreite. Sie spricht für vermehrte Korrekturbewegungen [177] und könnte dadurch eine signifikante Reduktion der Schrittbreite maskieren. Simieli et al. [177] konnten eine Zunahme der Schrittvariabilität beim IPS bereits nachweisen. Sowohl für das Gehen auf ebenem Boden, als auch für das Überqueren von Hindernissen wurden in der Literatur bereits Auffälligkeiten der Schrittbreite im Gangbild von IPS-Patienten festgestellt. Galna et al. [174] beobachteten ein breiteres Schrittmuster und interpretieren sie als aktive Strategie, um Defizite des Gleichgewichts zu kompensieren. Damit unterstützen sie die Vermutung, dass bei fehlender Zunahme der Schrittbreite das Sturzrisiko steigt. Als Einschlusskriterium wählten die Autoren eine Gehfähigkeit ohne Hilfsmaßnahmen von 10 Metern, sodass die Probanden der hier vorgelegten Studie aufgrund höherer Anforderungen vermutlich weniger eingeschränkt waren. Stegemöller et al. [154] hingegen konnten keine signifikante Veränderung der Schrittbreite nachweisen. Sie vermuten ebenfalls, dass eine unveränderte Schrittbreite insbesondere bei Zunahme von Oberkörperschwankungen als gefährliches Verhalten anzusehen ist. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die Schrittbreite erst mit fortschreitender Erkrankungsdauer als Kompensationsmechanismus dient und die Patienten erst später ein breites Gangmuster annehmen oder ob die Schrittbreite mit Zunahme der hypokinetischen Symptome weiter abnimmt und das Reaktionsvermögen auf Störungen des Gleichgewichts weiter einschränkt. Da ein breites Gangbild die Gleichgewichtskontrolle erleichtert und eine einfache Methode darstellt, das Gangbild zu stabilisieren, sollte sie ein grundlegender Bestandteil des Therapiemanagements darstellen. Für zukünftige Studien könnte der Zusammenhang zwischen Schrittbreite und IPS-Subtyp von Bedeutung sein. Möglicherweise würden IPS-Patienten vom akinetisch-rigiden Subtyp mehr von einer Zunahme der Schrittbreite profitieren.

Auch gesunde ältere Menschen gingen verglichen mit der jüngeren Kohorte mit unveränderter Schrittbreite über die Hindernisse. Mit zunehmendem Alter kommt es durch verschiedene Defizite zu Einschränkungen der Gangfähigkeit, denen mit einem breiten Gangmuster entgegengewirkt werden könnte. Ein erhöhtes Risiko für Gleichgewichtsverluste und mangelnde Anpassungsfähigkeit durch eine ausbleibende Veränderung Schrittbreite ist daher auch bei älteren Menschen denkbar. In vergangenen Studien wurde die Schrittbreite beim Gehen über ebene Flächen und beim Überqueren von Hindernissen bereits als reduziert dargestellt [154]. Lowrey et al. [167] hingegen konnten, in Übereinstimmung mit den vorliegenden Ergebnissen, keine signifikanten Veränderungen der Schrittbreite feststellen. Sie interpretieren die fehlende Zunahme der Schrittbreite ebenfalls als mögliche Ursache von

Gleichgewichtsverlusten. Insbesondere die Beobachtung einer geringeren Schrittbreite verdeutlicht die Notwendigkeit für weitere Untersuchungen. Als Ansatzpunkt therapeutischer Maßnahmen ist die Schrittbreite auch bei gesunden Älteren vielversprechend.

4.1.4 Oberkörperstabilität

Die posturale Instabilität zählt zu den häufigsten Symptomen des IPS und hat einen bedeutenden Einfluss auf das Gangbild der Patienten [40]. Durch negative Auswirkungen auf das Reflexmuster führt sie zu einer gestörten Koordination des Oberkörpers und folglich zu Gleichgewichtsstörungen. Unsicherheiten der Motorik, ein erhöhtes Sturzrisiko sowie Einschränkungen von Lebensqualität und funktioneller Unabhängigkeit im Alltag sind häufige Folgen [40] [213] [214]. Beim Gehen über Hindernisse wird die Gleichgewichtskontrolle vermutlich noch stärker beansprucht, sodass die Untersuchung der Oberkörperstabilität als Risikofaktor in diesen Situationen wichtige Hinweise liefern kann. Für verschiedene Situationen konnten posturographische Studien bereits Auffälligkeiten der Gleichgewichtskontrolle bei IPS-Patienten feststellen [215]. Mit steigenden Anforderungen an die Gleichgewichtskontrolle ist mit größeren Veränderungen der posturalen Stabilität zu rechnen. Daher untersuchte die erste Hypothese der vorliegenden Arbeit als weiteren Unterpunkt die Annahme, dass das IPS und der physiologische Alterungsprozess beim Gehen über Hindernisse mit Auffälligkeiten der Oberkörperbewegungen einhergehen. Die Ergebnisse liefern wichtige Hinweise, die sich der Hypothese und auch Ergebnissen vergangener Studien annähern und für die Notwendigkeit weiterer Studien über den Zusammenhang zwischen Rumpfstabilität und Sturzrisiko in Anwesenheit von Hindernissen sprechen [190] [154]. Ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Kohorten fand sich für den Winkel zwischen Hüfte und Thorax während des Führungsschritts. IPS-Patienten zeigten dabei ein ähnliches Verhalten wie gesunde junge Teilnehmer, während gesunde ältere Teilnehmer das Hindernis mit einem deutlich geringeren Winkel überquerten ($p = 0.024$). Aufgrund der posturalen Instabilität haben IPS-Patienten Schwierigkeiten, auf Auslenkungen des Oberkörpers zu reagieren und diese einzupendeln. Das Ausmaß an Oberkörperschwankungen könnte für IPS-Patienten daher das Risiko für Gleichgewichtsverluste erhöhen. Wie Abbildung 7 A zeigt, tendierten IPS-Patienten im Vergleich zur gesunden jungen Kohorte zu einer deutlichen Zunahme des Winkels zwischen Führungsbein und Hüfte ($p = 0.089$). Diese Beobachtungen sprechen für eine verstärkte Auslenkung des Rumpfes. Die abrupten Bewegungen über Hindernissen konnten vermutlich als Folge der posturalen Instabilität schlechter eingependelt werden. Das Verhalten erschwert die Gleichgewichtskontrolle und führt so zu einer Erhöhung des Sturzrisikos. Die zuvor beschriebene Einschränkung durch einen langen Verbleib in der

instabilen Einzelstandphase durch eine große Hindernisfreiheit könnte ebenfalls mit unseren Beobachtungen in Verbindung stehen. Die Einzelstandphase führt bei Dekompensation der Haltemuskulatur zu Schwankungen des Oberkörpers. IPS-Patienten scheinen die Bewegungen des Oberkörpers noch ausreichend stabilisieren zu können. Aufgrund der beschriebenen Tendenzen und der Ergebnisse vergangener Studien ist mit einer deutlicheren Ausprägung der posturalen Instabilität bei längerer Erkrankungsdauer zu rechnen. Die Zunahme der Hindernisfreiheit spielt dabei ebenfalls eine Rolle, da sie die Gleichgewichtskontrolle reduziert. Möglicherweise reichte die Schrittbreite der Probanden noch aus, um adäquat auf die Bewegungen des Oberkörpers reagieren zu können. Auch die in vergangenen Studien beschriebene Abnahme der Ganggeschwindigkeit und die zum Teil beobachtete Verlängerung der Doppelstandphase ermöglichen durch geringere Nettobewegungen des Oberkörpers vermutlich eine gewisse Kompensation der posturalen Instabilität. Zu bedenken ist, dass diese Kompensation bei therapeutischer Verbesserung der Ganggeschwindigkeit wegfällt. Das Training von Muskelkraft und Balance ist dann von noch größerer Bedeutung. Die Ausprägung der posturalen Instabilität aufgrund des IPS-Subtyps ist bei der Interpretation der Ergebnisse ebenfalls zu berücksichtigen. Vermutlich zeigen Patienten vom PIGD-Subtyp, der durch eine Dominanz der posturalen Instabilität definiert ist [216], deutlichere Veränderungen der Oberkörperschwankungen als Patienten mit einem akinetisch-rigiden IPS oder einem IPS vom tremor-dominantem Subtyp. Der Vergleich dieser Subtypen und ihr Verhalten bei der Überwindung von Hindernissen könnte für die individuelle therapeutische Herangehensweise interessant sein. So würden IPS-Patienten vom PIGD-Typ mehr von Gleichgewichtsübungen profitieren können. Zuletzt ist in Erwägung zu ziehen, dass JE durch den geringen Schweregrad der Aufgabe und einer daraus resultierenden Selbstsicherheit vermutlich eher „locker“ über die Hindernisse gingen. Folge wären vermehrte Auslenkungen des Oberkörpers und eine Annäherung an das Verhalten der AE und der IPS-Patienten. Für den Winkel zwischen Hüfte und Thorax beim Folgeschritt tendierte das Verhalten der IPS-Patienten verglichen mit gesunden jungen Teilnehmern zu einem geringeren Winkel ($p = 0.054$). Bei IPS-Patienten kann eine fehlende Beweglichkeit dieses Körpersegments auf die Leitsymptomatik der Erkrankung zurückzuführen sein. Die starre Beweglichkeit von Kopf und Rumpf wird als sogenannte „en-bloc-Bewegung“ beschrieben und könnte einen Einfluss auf die Beweglichkeit beim Hindernis haben [217]. Es stellt sich die Frage, ob dieses Verhalten zu einer verminderten Anpassungsfähigkeit führt oder die Stabilität über dem Hindernis erhöht. Der Zusammenhang zwischen axialem Rigor und segmentaler Kontrolle beim Gehen über Hindernisse liefert Raum für weitere Untersuchungen.

Eine Veränderung der Oberkörperbewegungen von IPS-Patienten beim Gehen über Hindernisse konnte in der Literatur bereits von zwei Studien beschrieben werden, deren Ergebnisse sich mit den Tendenzen der hier dargelegten Ergebnisse vereinbaren lassen.

Stegemöller et al. [154] fanden verstärkte Schwankungen des Oberkörpers in der medio-lateralen Ebene heraus, erreichten jedoch ebenfalls keine Signifikanz. Galna et al. [190] berichten von ähnlichen Auffälligkeiten im Verhalten von IPS-Patienten, hier sogar mit signifikanten Ergebnissen. Die Autoren nennen den vermehrten Einsatz der Hüftmuskulatur, die sogenannte „pelvis hiking strategy“, beim Anheben der Beine über die Hindernisse als mögliche Ursache für ihre Ergebnisse. Demnach benötigen IPS-Patienten mehr Muskelkraft, um eine eingeschränkte Beweglichkeit der Gelenke kompensieren zu können. Die krankheitsbedingte Muskelschwäche würde sich dann jedoch auf die Gleichgewichtskontrolle auswirken. Die Autoren beschreiben weiterhin einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Oberkörperschwankungen und dem Schweregrad der Erkrankung. Auch Blaszczyk et al. [218] konnten schon eine Korrelation zwischen motorischen Symptomen und Ausmaß der seitlichen Oberkörperschwankungen zeigen. Beim Vergleich der vorgelegten Studie mit den Resultaten von Galna et al. [174] ist die Verwendung unterschiedlicher Messpunkte zu berücksichtigen. Sie untersuchten den Winkel zwischen Körperschwerpunkt und Druckmittelpunkt (Center of pressure) [190].

Der physiologische Alterungsprozess geht unter anderem mit Defiziten von Sehkraft und propriozeptiver Wahrnehmung einher, die sich negativ auf das Gangbild auswirken und auch das motorische Verhalten in Anwesenheit von Hindernissen beeinflussen [219]. In der Literatur ist zudem beschrieben, dass eine instabile Körperhaltung zu den häufigen Ursachen von Stürzen älterer Menschen gilt [172]. Die zweite Hypothese vermutete daher auch bei gesunden älteren Teilnehmern Auffälligkeiten im Verhalten des Oberkörpers beim Gehen über die Hindernisse. Entgegen den Erwartungen fiel bei den Untersuchungen verglichen mit den beiden anderen Kohorten ein signifikant kleinerer Winkel zwischen Hüfte und Brustkorb während des Führungsschritts auf. Sie konnten die Auswirkungen der erhöhten Anforderungen an Gleichgewichtskontrolle und Koordination in Anwesenheit der Hindernisse kompensieren und eine stabile Körperhaltung aufrechterhalten. Das vermehrte Vorkommen einer Sturzangst bei älteren Menschen [133] könnte zu einer starren Körperhaltung beitragen und für die Beobachtungen mitverantwortlich sein. Das Verhalten könnte zudem durch die in der Literatur beschriebene Abnahme der Gehgeschwindigkeit [142] erklärt werden. Diese führt zu einer Abnahme der Nettobewegungen und erleichtert das Einpendeln von Oberkörperschwankungen. Ältere Menschen in der hier untersuchten Altersspanne zeigten somit keine Defizite der Gleichgewichtskontrolle. Die Ergebnisse decken sich mit Beobachtungen von Lowrey et al. [167], die sogar in Anwesenheit zweier Hindernisse keine Auffälligkeiten im Verhalten älterer Menschen nachweisen konnten. Auch Hahn und Chou [136] konnten keine vermehrten Oberkörperauslenkungen in der medio-lateralen Ebene feststellen. Weitere Forschung mit einem Fokus auf das Verhalten des Oberkörpers mit

Teilnehmern im höheren Lebensalter sind wichtig, um die ätiologischen Faktoren des erhöhten Sturzrisiko zu verstehen und präventive Maßnahmen entwickeln zu können.

4.2 Der Effekt von hohem Alter und IPS auf räumlich-zeitliche Gangparameter und die Oberkörperstabilität beim Überwinden des 20 cm hohen Hindernisses

4.2.1 Räumlich-zeitliche Gangparameter

Wie zuvor beschrieben, haben der physiologische Alterungsprozess und das IPS negative Einflüsse auf Körperfunktionen wie Kognition und Muskelkraft, die eine adäquate Hindernisüberwindung erschweren können und die Motorik bei Zunahme der Hindernishöhe möglicherweise noch stärker beeinträchtigen. Daher wurden in einem zweiten Durchgang dieser Studie die räumlich-zeitlichen Gangparameter und die Oberkörperstabilität der drei Kohorten in Anwesenheit eines 20 cm hohen Hindernisses untersucht. Trotz fehlender Signifikanz lässt sich mithilfe von Graphik 8 B erkennen, dass IPS-Patienten und gesunde ältere Menschen das Folgebein mit mehr Hindernisfreiheit über das Hindernis führen. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten könnte eine eingeschränkte Präzision der Bewegung sein. Die alters- und IPS-bedingten visuellen, kognitiven und propriozeptiven Einschränkungen verhindern möglicherweise die präzise Abschätzung der Distanz zwischen Fuß und Hindernis [154]. Die Beobachtung, dass die Hindernisfreiheit des Folgebeins größer ist als die des Führungsbeins spricht für den Einfluss der visuellen Kontrolle auf die Präzision. Das Folgebein kann in der Schwungphase des Gangzyklus nicht mit dem Blick verfolgt werden, sodass die Abschätzung der Fuß-Hindernis-Distanz erschwert ist. Das Verhalten ist primär als sicher, aber energieaufwendig einzuschätzen. Es kann jedoch auch gefährlich werden, wenn das Verhalten z.B. dadurch erklärt werden würde, dass der Fokus des Teilnehmers visuell, mit dem Führungsbein, so stark auf das Hindernis gerichtet wird, dass dadurch die Wahrnehmung für das umgebende bzw. nachfolgende Geschehen (z.B. die Bewegung des Folgebeins) vernachlässigt wird. Im Alltag treten häufig Situationen auf, in denen ein uneingeschränkter Blick auf die Füße und das vorliegende Hindernis nicht möglich ist und die visuelle Kompensation dann nicht mehr möglich ist. Das Üben der Hindernisüberwindung ohne Blick in Richtung Hindernis könnte diesem Verhalten entgegenwirken. Wie in Abschnitt 4.1. beschrieben, könnte das vermehrte Vorkommen einer Sturzangst bei IPS-Patienten und Menschen im höheren Lebensalter [154] [160] eine große Hindernisfreiheit zur Folge haben. Mit zunehmender Hindernishöhe nimmt die Bedeutung dieses psychischen Aspekts vermutlich weiter zu. Es ist möglich, dass die Muskelkraft in frühen Stadien der Erkrankung noch

ausreicht, um eine große Hindernisfreiheit zu erzielen und die Angst vor Stürzen eine möglichst präzise Überwindung der Hindernisse verhindert. Durch eine größere Hindernisfreiheit wird das Risiko für unerwartete Hinderniskontakte reduziert, die beiden Kohorten sind jedoch durch die bereits beschriebene Verlängerung der instabilen Einzelstandphase einem erhöhten Risiko für Gleichgewichtsverluste ausgesetzt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass dieser Parameter interessant für zukünftige prospektive Sturzrisiko-Studien dieser Kohorten ist. Wie Abbildung 8 C-E zeigt, scheinen IPS-Patienten und gesunde ältere Menschen verglichen mit der gesunden jungen Kohorte auch beim 20 cm hohen Hindernis die horizontalen Fuß-Hindernis-Abstände zu reduzieren und eine unveränderte Schrittbreite anzunehmen. Eine Signifikanz erreichten diese Ergebnisse jedoch nicht. Auf eine erneute Diskussion dieser Beobachtungen wird an dieser Stelle verzichtet (siehe Unterpunkt 4.1). Die Messungen räumlich-zeitlicher Gangparameter erreichten keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Kohorten. Dennoch lassen sich anhand der Ergebnisse bedeutende Schlüsse für mögliche Ursachen des erhöhten Sturzrisikos und Therapieansätze ziehen. Untersuchungen von Stegemöller et al. [154] ergaben eine größere Hindernisfreiheit von IPS-Patienten verglichen mit gesunden Probanden. Die Beobachtungen konnten sowohl für das Führungs-, als auch für das Folgebein gemacht werden, erreichten jedoch keine Signifikanz. Sie decken sich somit zum Teil mit den hier beschriebenen Ergebnissen. Die Autoren interpretieren das Verhalten ebenfalls als Folge einer Angst vor Stürzen und dem daraus resultierenden Streben nach Sicherheit. Die Probanden der Studie absolvierten die Hindernisüberwindung allerdings barfuß, während Teilnehmer der vorliegenden Studie mit festem Schuhwerk gingen. Durch die Schuhe haben die Probanden vermutlich mehr Stabilität, was sich auch in den Ergebnissen widerspiegeln könnte. Weiterhin erwähnen Stegemöller et al. [154] die sensorischen Defizite der IPS-Patienten als mögliche Ursache der Tendenz zu größerer Hindernisfreiheit. Die periphere Neuropathie betrifft bis zu 55% aller IPS-Patienten und geht mit Beeinträchtigungen der motorischen Fähigkeiten einher [220]. Durch eine mangelnde propriozeptive Wahrnehmung als Folge der Neuropathie sind Defizite der zentralen Integration peripherer sensorischer Informationen zur Herstellung einer posturalen Stabilität denkbar. Die Untersuchung der Beweglichkeit verschiedener Gelenke bei Patienten mit Neuropathie insbesondere der unteren Extremität rückt zunehmend in den Fokus der Wissenschaft. Eine Zunahme der Fußfreiheit bei IPS-Patienten mit nachgewiesener peripherer Neuropathie konnte bereits gezeigt werden [221]. Welchen Einfluss die Neuropathie auf die Motorik in Anwesenheit von Hindernissen hat, ist jedoch noch wenig untersucht. Dietz et al. [222] konnten zeigen, dass IPS-Patienten Schwierigkeiten hatten, eine möglichst kleine Hindernisfreiheit zu generieren, nachdem sie gebeten wurden das Bein so nah wie möglich am Hindernis vorbeizuführen, ohne es zu berühren. Die Patienten zeigten größere Hindernisfreiheiten als gesunde Probanden und bestätigten damit die Annahme, Schwierigkeiten in der Präzision

aufzuweisen. Propriozeptives Training sowie die Verbesserung von Sehkraft und Kognition könnten zu einer präziseren Bewegungskontrolle beitragen. Zudem sind weitere Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen psychischer Belastung mit Angst vor Stürzen und dem Verhalten beim Überqueren von Hindernissen therapeutisch von Bedeutung.

4.2.2 Oberkörperstabilität

Für die Winkel zwischen den gewählten Körpersegmenten zur Darstellung der Oberkörperstabilität konnten für das 20 cm hohe Hindernis keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Kohorten nachgewiesen werden. Wie Abbildung 9 A-F jedoch zeigen überquerten IPS-Patienten die Hindernisse im Vergleich zur gesunden jungen Kohorte eher mit größeren Winkeln. Eine Tendenz zur Signifikanz ergab sich dabei für den Winkel zwischen Folgebein und Brustkorb ($p = 0.045$). Wie oben erläutert, sind die Zunahme der Hindernisfreiheit mit konsekutiver Verlängerung der Einzelstandphase sowie die posturale Instabilität mögliche Ursachen für stärkere Schwankungen des Oberkörpers bei IPS-Patienten. Möglicherweise könnte diesen Schwankungen mithilfe einer Zunahme der Schrittbreite entgegengewirkt werden. Ein breiterer Gang und Gleichgewichtsübungen gewinnen durch diese Beobachtungen weiter an Bedeutung für die therapeutische Betreuung von IPS-Patienten. Untersuchungen mit weiterer Zunahme der Hindernishöhe könnten die Ausprägung des Verhaltens noch deutlicher darstellen und den Zusammenhang zwischen Schrittbreite und Oberkörperstabilität näher untersuchen.

4.3 Veränderungen von klinischen Gangparametern und der Oberkörperstabilität in Abhängigkeit von der Hindernishöhe

Nachdem in den ersten beiden Hypothesen das Verhalten der drei Kohorten verglichen wurde, stand die Veränderung von Gangparametern und Oberkörperstabilität bei Zunahme der Hindernishöhe im Fokus der dritten Hypothese. Dabei wurde die Anpassung des Gangverhaltens und der Oberkörperstabilität zwischen den drei Kohorten verglichen. Ziel der vorgelegten Studie war zu sehen, ob IPS-Patienten und ältere Menschen durch die Zunahme der Hindernishöhe ihr Verhalten anders anpassen müssen als gesunde junge Menschen. Wie bereits erwähnt, konnten in der Vergangenheit keine eindeutigen Ergebnisse für die Hindernisfreiheit von IPS-Patienten und gesunden Menschen im höheren Lebensalter festgestellt werden. Während für IPS-Patienten verglichen mit gesunden Menschen bereits eine Zunahme der Hindernisfreiheit notiert werden konnte, zeigte eine Studie mit zwei aufeinanderfolgenden Hindernissen eine vergleichsweise Reduktion der Hindernisfreiheit von

IPS-Patienten [188]. Der Schwierigkeitsgrad von Hindernissen scheint also einen Einfluss auf die Gangparameter zu haben. Der Vergleich der Hindernisfreiheit zwischen dem 10 cm und dem 20 cm hohen Hindernis der vorliegenden Studie ergab jedoch keine signifikanten Unterschiede für die drei Kohorten. Wie in Abbildung 10 B zu sehen, hatten IPS-Patienten verglichen mit den anderen Kohorten die größte Zunahme der Hindernisfreiheit des Folgebeins. Diese Beobachtung lässt sich mit den bereits unter 4.1 und 4.2 diskutierten Punkten vereinbaren. Je höher das Hindernis, desto größer könnte die Sturzangst und damit das Bedürfnis eines großen Fuß-Hindernis-Abstands sein. Weiterhin könnte die mangelnde Präzision von IPS-Patienten mit der Hindernishöhe zunehmen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist erneut zu bedenken, dass eine größere Hindernisfreiheit mehr Belastung für Muskelkraft und Gleichgewicht bedeutet. Das Verhalten ist als energieaufwendiger und riskanter zu werten. Die sichtliche Tendenz des Folgebeins, bei gleichbleibender Hindernisfreiheit des Führungsbeins mehr Hindernisfreiheit zu „produzieren“, spricht für die zuvor genannte Vermutung, dass eine mangelnde visuelle Kontrolle des Folgebeins zu einer unpräzisen Bewegung beitragen könnte. Weil das Führungsbein mit dem Blick verfolgt werden kann, wird dieses präziser über das Hindernis befördert als das Folgebein. Untersuchungen mit weiteren Hindernishöhen könnten klären, ob sich die Hindernisfreiheit mit steigender Hindernishöhe zunehmend vergrößert, oder ob ab einer bestimmten Höhe Muskelschwäche oder Hypokinese zu einer geringeren Hindernisfreiheit führen. Die Veränderungen der horizontalen Fuß-Hindernis-Abstände ergaben, wie Abbildung 10 C und D zeigt, keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kohorten. IPS-Patienten und gesunde ältere Teilnehmer erreichten eine ausreichende Distanz vor dem Hindernis. Dies spricht erneut für die bereits beschriebene Robustheit des Parameters und wichtige Bedeutung einer ausreichenden Zehenspitzen-Hindernis-Distanz für eine adäquate Hindernisüberwindung. Bei allen drei Kohorten kam es zu einer deutlichen Abnahme der Fersen-Hindernis-Distanz. Dadurch steigt das Risiko für Hinderniskontakte bei Zunahme der Hindernishöhe. Besonders deutlich wird die Reduktion dieses Abstands bei gesunden älteren Teilnehmern. Möglicherweise haben ältere Menschen durch eine Schwäche der Beinmuskulatur Schwierigkeiten, bei zunehmender Hindernishöhe eine ausreichende Schrittlänge zu erreichen. Weiterhin denkbar ist, dass die genannte Kohorte durch eine möglichst schnelle Positionierung der Füße hinter den Hindernissen versucht, die instabile Einzelstandphase zu reduzieren, um die Gleichgewichtskontrolle zu verbessern. Auch die Schrittbreite aller drei Kohorten blieb bei Zunahme der Hindernishöhe ohne signifikante Veränderung (siehe Abbildung 10 E). Mit zunehmender Hindernishöhe steigen jedoch die Anforderungen an Muskelkraft und Gleichgewichtskontrolle, sodass die fehlende Zunahme der Schrittbreite zur Stabilisierung des Gangbildes ein Risiko darstellen könnte. Bei gesunden älteren Teilnehmern deutet sich in der Graphik sogar eine Abnahme der Schrittbreite bei Zunahme der

Hindernishöhe an. In Übereinstimmung mit der hier beobachteten Tendenz konnten Vitório et al [173] ebenfalls eine größere Hindernisfreiheit bei Zunahme der Hindernishöhe nachweisen. Die Ergebnisse der abnehmenden Fersen-Hindernis-Abstände lassen sich zudem mit Ergebnissen vergangener Untersuchungen vereinbaren, in denen die Fersen-Hindernis-Distanz mehrheitlich reduziert dargestellt wurde [150] [192]. Weiterhin konnte bereits eine Abnahme der genannten Distanz bei Zunahme der Hindernishöhe nachgewiesen werden [223]. Im klinischen Alltag könnte die Verwendung höherer Hindernisse zur Detektion älterer Menschen mit erhöhtem Sturzrisiko von diagnostischer Bedeutung sein. Weiterhin verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Schrittlänge einen möglichen Ansatzpunkt zur Reduktion der Sturzrate darstellt.

Wie aus den zuvor beschriebenen Ergebnissen hervorgeht, untersuchte die vorliegende Studie die Hypothese, dass stärkere Schwankungen des Oberkörpers von IPS-Patienten und gesunden älteren Menschen im Vergleich zu gesunden Jüngeren auf eine Schwierigkeit der Gleichgewichtskontrolle bei der Hindernisüberquerung hindeuten. Es zeigten sich jedoch auch für die Parameter der Gleichgewichtskontrolle keine signifikanten Veränderungen bei Zunahme der Hindernisfreiheit (siehe Abbildung 11 A-F). Für die Winkel zwischen Folgebein und Hüfte, zwischen Folgebein und Brustkorb sowie zwischen Hüfte und Brustkorb beim Führungsschritt wurde jedoch eine stärkere Zunahme bei IPS-Patienten sichtbar. Ursächlich könnte die posturale Instabilität sein, die zu vermehrten Auslenkungen des Oberkörpers führt. Weiterhin könnten die Bewegungen dabei helfen, die adäquate Schritthöhe zu erreichen.

Die Fersen-Hindernis-Distanz gesunder, älterer Menschen stellt einen möglichen Risikofaktor für das vermehrte Auftreten von Stürzen in Anwesenheit von Hindernissen dar. Die Hindernisfreiheit des Folgebeins, die Fersen-Hindernis-Distanz sowie die Schwankungen des Oberkörpers von IPS-Patienten zeigten bei Zunahme der Hindernishöhe sichtliche Veränderungen, die sich den Hypothesen der vorgelegten Arbeit annähern und mit zum Teil bereits durchgeführten Untersuchungen vereinbaren lassen. Die Ergebnisse zeigen ferner, dass eine weitere Zunahme der Hindernishöhe die IPS- und altersbedingten Defizite der Teilnehmer verdeutlichen könnte und zu einer Signifikanz der Ergebnisse hätte beitragen können. Die Notwendigkeit wissenschaftlichen Interesses wird deutlich.

4.4 Zusammenhang zwischen positiver Sturzanamnese und räumlich-zeitlichen Gangparametern

Menschen, die in der Vergangenheit aufgrund des IPS oder im Rahmen des Alterungsprozesses bereits gestürzt sind, haben ein nachweislich erhöhtes Risiko für einen erneuten Sturz [198]. Es besteht wachsende Evidenz, dass eine positive Sturzanamnese zu den wichtigsten Faktoren eines erhöhten Sturzrisikos zählt [71]. Die Ergebnisse zeigten eine größere Hindernisfreiheit des Führungsbeins in Anwesenheit des niedrigen Hindernisses bei IPS-Patienten mit positiver Sturzanamnese. Die vierte Hypothese kann daher zum Teil bestätigt werden. Zwischen der Sturzanamnese und weiteren demographischen und klinischen Parametern zeigten sich keine signifikanten Zusammenhänge. In den ersten Hypothesen wurde bereits beschrieben, dass IPS-Patienten und gesunde ältere Menschen aufgrund von körperlichen Einschränkungen möglicherweise eine geringere Präzision motorischer Abläufe aufweisen. Folge ist eine größere Distanz zwischen Fuß und Hindernis und eine daraus resultierende Verlängerung Schwungphase über den Hindernissen. Während der Schwungphase befindet sich nur ein Bein auf dem Boden, Hüftmuskulatur und Haltefunktionen werden verstärkt beansprucht und insbesondere Menschen mit defizienter Körperstabilität sind vulnerabler gegenüber äußeren Einflüssen. Als möglicher kausaler Faktor ist zudem die Angst vor Stürzen zu nennen. Unsicherheiten im Gangbild und das Erleben von Stürzen in der Vergangenheit haben ein vorsichtiges Verhalten zur Folge, dass sich in einer größeren Hindernisfreiheit äußert. Die Folge ist ein vermehrtes Auftreten von Stürzen und die Entstehung eines Circulus vitiosus. Das Training einer präzisen Hindernisfreiheit durch Verbesserung visueller, kognitiver und propriozeptiver Fähigkeiten könnte einen möglichen Ansatzpunkt darstellen und diesen Teufelskreis durchbrechen, um wiederkehrende Stürze zu reduzieren. Zudem ist der Parameter im klinischen Alltag leicht zu erheben und könnte bei der Detektion gefährdeter Patienten von diagnostischer Bedeutung sein. Auch Pan et al. [152] konnten in ihren Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen dem Sturzrisiko und der Hindernisfreiheit feststellen. Teilnehmer mit Defiziten der Gleichgewichtskontrolle, ermittelt anhand des Tinetti-Balance-Tests, überquerten Hindernisse mit einer größeren Hindernisfreiheit als Teilnehmer ohne Risiko für Stürze. Alcock et al. [224] führten ebenfalls eine Hindernisstudie durch und beobachteten eine Korrelation zwischen einer positiven Sturzanamnese und einem breiten Gangbild. Unsere Untersuchungen ergaben jedoch keine Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Sturzanamnese und weiteren räumlich-zeitlichen Gangparametern. IPS-Patienten und gesunde ältere Menschen zeigten trotz fehlender Signifikanz eine abnehmende Schrittbreite, sodass die Resultate von Alcock et al. [224] nicht bestätigt werden konnten.

Es zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen einer positiven Sturzanamnese und einer vergrößerten Hindernisfreiheit des Folgebeins bei IPS-Patienten. Ein großer Abstand zwischen Fuß und Hindernis in der vertikalen Ebene erhöht die Anfälligkeit für Gleichgewichtsverluste und könnte daher als wichtiger Kausalitätsfaktor des erhöhten Sturzrisikos von IPS-Patienten und gesunden älteren Menschen angesehen werden. Weitere Studien mit einem Fokus auf den Einfluss der Hindernisfreiheit auf ein erhöhtes Sturzrisiko sind daher von besonderer Bedeutung. Die Hindernisfreiheit könnte bezüglich der Sturzprävention diagnostisch und therapeutisch einen Fortschritt bringen. Insbesondere Studien mit Einschluss von IPS-Patienten weiter fortgeschrittenen Stadien und gesunden Menschen in einem höheren Lebensalter sind für neue Erkenntnisse wichtig.

5 Limitationen

Als Limitation der vorliegenden Studie kann die geringe Anzahl an Studienteilnehmern gesehen werden. Zu nennen ist zu dem ein deutlich höherer Anteil männlicher Probanden. Es besteht Evidenz, dass Frauen unter anderem weniger Muskelkraft besitzen [225] und häufiger an einer Angst vor Stürzen leiden [226]. Möglicherweise sind alters- und IPS-bedingte Defizite bei Frauen noch stärker ausgeprägt und hätten zu signifikanteren Ergebnissen führen können. Erklärt werden könnte die Limitation durch das häufigere Vorkommen des IPS beim männlichen Geschlecht [227]. Eine weitere Limitation ist die fehlende Anpassung der Hindernisse an die Größe unserer Probanden. Dadurch entstehen unterschiedliche Voraussetzungen für die Studienteilnehmer, die Einfluss auf unsere Ergebnisse haben könnten. Es ist jedoch zu bedenken, dass kleinere Menschen auch im Alltag die gleichen Hindernishöhen bewältigen müssen wie größere Menschen, und sich die Größe zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschied. Die IPS-Patienten dieser Studie waren überwiegend zur stationären Behandlung auf der neurologischen Station oder für diagnostische und therapeutische Ursachen in der Ambulanz des UKSH Standort Kiel. Demnach waren die Patienten unter engmaschiger therapeutischer Kontrolle und ihre medikamentöse Therapie bestmöglich eingestellt. Der Einschluss von IPS-Patienten ohne diese Anbindung hätte möglicherweise weitere Defizite aufgedeckt

6 Zusammenfassung

Menschen im höheren Lebensalter und IPS-Patienten erleiden Einschränkungen zahlreicher motorischer Fähigkeiten und körperlicher Funktionen. Insbesondere Gangbild, Gleichgewichtskontrolle, Kognition und sensorische Wahrnehmungen sind betroffen. Eine erhöhte Sturzrate sowie die Zunahme von Hospitalisierung und letztlich auch von Morbidität und Mortalität sind die Folge. Knapp ein Drittel aller Menschen ab einem Alter von 65 Jahren stürzt mindestens einmal im Jahr und das Risiko steigt mit zunehmendem Alter weiter an [228]. Unter IPS-Patienten stürzen jährlich bis zu 68% [60], wobei knapp 35% dabei eine Fraktur erleiden [62]. Ein Großteil der Betroffenen berichtet von Stürzen nach Stolpern über Hindernisse [64]. Um die zugrundeliegenden Mechanismen der enormen Anzahl an Stürzen besser zu verstehen, gefährdete Menschen frühzeitig erkennen zu können und präventive Maßnahmen zu verbessern, ist eine detaillierte Untersuchung der Hindernisüberquerung notwendig. In der vorgelegten Studie wurde daher das Verhalten beim Überqueren von Hindernissen von gesunden jungen Erwachsenen, gesunden älteren Menschen und IPS-Patienten mithilfe eines objektiven 3D Bewegungsanalysesystems verglichen. Mit den entsprechenden Markern des Analysesystems ausgestattet, gingen alle Probanden eine Strecke von fünf Metern und überquerten dabei ein Hindernis, das drei Meter von der Startlinie entfernt aufgestellt wurde. Im ersten Durchgang war das Hindernis 10 cm hoch, im zweiten Durchgang 20 cm hoch. Es wurden räumlich-zeitliche Gangparameter untersucht, um die Abstände zwischen Fuß und Hindernis darzustellen und das Risiko für einen Hinderniskontakt zu vergleichen. Weiterhin wurde durch die Beobachtung von Winkeln zwischen Körpersegmenten die Oberkörperstabilität untersucht, die Hinweise auf vorhandene Defizite der Gleichgewichtskontrolle liefern sollte. Ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Kohorten ergab sich für den Winkel zwischen Hüfte und Brustkorb während des Führungsschritts über das 10 cm hohe Hindernis ($p = 0.024$). Gesunde ältere Teilnehmer hatten dabei einen geringeren Winkel als die beiden anderen Kohorten. Für die weiteren räumlich-zeitlichen Gangparameter und die Maße zur Darstellung der Oberkörperstabilität zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Dennoch zeigten die Ergebnisse Veränderungen im Verhalten von IPS-Patienten und gesunden älteren Probanden. Die Zunahme der Hindernisfreiheit in Kombination mit einer verringerten Schrittbreite könnte sich negativ auf die Gleichgewichtskontrolle auswirken. Des Weiteren sprach die Abnahme der Fersen-Hindernis-Distanz für die bereits oftmals gezeigte Abnahme der Schrittlänge beider Kohorten. Dadurch erhöht sich das Risiko für einen Hinderniskontakt. Nach Messung der Winkel zwischen Füßen und Hüfte, zwischen Füßen und Brustkorb sowie zwischen Hüfte und Brustkorb schienen die beiden Kohorten auch die Stabilität des Oberkörpers in Anwesenheit beider Hindernisse aufrechterhalten zu können. Die Tendenz von IPS-Patienten zu einer

stärkeren Auslenkung des Oberkörpers lieferte jedoch Hinweise auf Defizite der Gleichgewichtskontrolle und könnte die posturale Instabilität als Folge des IPS darstellen. Die Untersuchung der Veränderung gemessener Parameter in Abhängigkeit von der Hindernishöhe ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Gruppen. IPS-Patienten zeigten jedoch tendenziell die stärkste Zunahme der Hindernisfreiheit, die durch eine Zunahme der Sturzangst erklärt werden könnte und für ein erhöhtes Sturzrisiko bei Zunahme der Hindernishöhe spricht. Zuletzt wurde der Zusammenhang zwischen einer positiven Sturzanamnese der Probanden und den klinischen und demographischen Parametern analysiert. Die Untersuchungen ergaben eine größere Hindernisfreiheit des Führungsbeins beim Gehen über das niedrige Hindernis bei IPS mit bereits erlebten Stürzen in der Anamnese. Eine große Hindernisfreiheit geht mit einer Verlängerung der instabilen Einzelstandphase einher und bedeutet eine stärkere Belastung für die Muskulatur der unteren Extremitäten und der Gleichgewichtskontrolle. Der Parameter könnte daher als wichtiger Prädiktor eines erhöhten Sturzrisiko in Frage kommen.

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Gruppen und Probandenanzahl.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 2: Ein- und Ausschlusskriterien der Studienteilnehmer.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 3: Lokalisation der relevanten Marker für die Untersuchungen.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 4: Eigenschaften der Hindernisse.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 5: Aus Kamera-basierten Daten extrahierte Parameter zur Untersuchung der Hindernisüberwindung und die in der Literatur bereits bekannten Veränderungen dieser Parameter bei älteren Menschen und IPS-Patienten.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 6: Parameter aus Anamnese und klinischer Untersuchung.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 7: ANOVA-Werte und Post Hoc Analyse der räumlich-zeitlichen Gangparameter beim Überqueren des 10 cm hohen Hindernisses.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 8: ANOVA-Werte und Post Hoc Analyse der Oberkörperstabilität beim Überqueren des 10 cm hohen Hindernisses.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 9: P-Werte räumlich-zeitlicher Gangparameter beim Überqueren des 20 cm hohen Hindernisses.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabelle 10: P-Werte und Post Hoc Analyse der Oberkörperstabilität beim Überqueren des 20 cm hohen Hindernisses.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 11: P-Werte für den Vergleich der Anpassung räumlich-zeitlicher Gangparameter zwischen den drei Kohorten in Abhängigkeit von der Hindernishöhe.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 12: P-Werte für den Vergleich der Anpassung der Oberkörperstabilität zwischen den drei Kohorten in Abhängigkeit von der Hindernishöhe.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabelle 13: Korrelation zwischen Sturzrate und Hindernisfreiheit für alle Kohorten zusammen.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 14: Zusammenhang zwischen Sturzrate und demographischen Daten sowie Sturzrate und räumlich-zeitlichen Gangparametern dargestellt mithilfe der Rangkorrelation nach Spearman für die einzelnen Gruppen.....</i>	<i>43</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gangzyklus beim Gehen über Hindernisse (verändert nach Vitório et al., 2009 [150]). Für ein sicheres Überwinden wird zuerst das Führungsbein (leading limb) und anschließend das Folgebein (trailing limb) über das Hindernis befördert [151]. In den meisten Fällen wird das stärkere Bein als Führungsbein verwendet, wobei sich diese Selektion mit Zunahme der Hindernishöhe noch verstärkt [152] [153]. Wie im normalen Gangzyklus können eine Schwung- und eine Standphase unterschieden werden. Die Schwungphase bezeichnet die Zeit ab dem Verlassen des Fußes vom Boden bis zum erneuten Bodenkontakt [154]. _____ 13

Abbildung 2: Untersuchungsfläche im Motoriklabor. _____ 22

Abbildung 3: Schematische Darstellung der räumlich-zeitlichen Gangparameter. A: räumlich-zeitliche Gangparameter vor, über und hinter dem Hindernis. Abkürzungen: FFoB = Fuß des Folgebeins; FFüB = Fuß des Führungsbeins; SB = Schrittbreite. B: Hindernisdistanz in der vertikalen Ebene. _____ 28

Abbildung 4: Programm zur Verarbeitung der gewonnenen Daten (Qualisys Track Manager, AB, Göteborg, Sweden). Marker, die auf den anatomischen Landmarken der Probanden platziert wurden, mussten nach den Untersuchungen den entsprechenden Körperteilen zugeordnet werden. _____ 28

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Messung der Oberkörperstabilität mithilfe von Winkeln zwischen Körpersegmenten. A: Simulation der Orientierung aller Körpersegmente eines Probanden mithilfe eines 3D-Koordinatensystems; B: Orientierung von Fuß, Hüfte und Brustkorb: α : Winkel zwischen Brustkorb und Hüfte; β : Winkel zwischen Brustkorb und Fuß; γ : Winkel zwischen Hüfte und Fuß. _____ 29

Abbildung 6: Vergleich räumlich-zeitlicher Gangparameter zwischen den drei Kohorten für das 10 cm hohe Hindernis. AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene. _____ 33

Abbildung 7: Vergleich der Oberkörperstabilität mithilfe von Winkelmessungen verschiedener Körpersegmente zwischen den drei Kohorten für das 10 cm hohe Hindernis. AE: alte Erwachsene; Führungsschritt: Schwungphase, in der sich das Führungsbein über dem Hindernis befindet; Folgeschritt: Phase, in der sich das Folgebein über dem Hindernis befindet; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene. _____ 34

Abbildung 8: Vergleich räumlich-zeitlicher Gangparameter zwischen den drei Kohorten für das 20 cm hohe Hindernis. AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene. _____ 36

Abbildung 9: Vergleich der Oberkörperstabilität mithilfe von Winkelmessungen verschiedener Körpersegmente zwischen den drei Kohorten für das 10 cm hohe Hindernis. JE: junge Erwachsene;

AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; Führungsschritt: Schwungphase, in der sich das Führungsbein über dem Hindernis befindet; Folgeschritt: Phase, in der sich das Folgebein über dem Hindernis befindet. _____ 38

Abbildung 10: Vergleich der Adaptation räumlich-zeitlicher Gangparameter an die Hindernishöhe zwischen den drei Kohorten. AE: alte Erwachsene; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene. _____ 40

Abbildung 11: Vergleich der Adaptation der Oberkörperstabilität an die Hindernishöhe zwischen den drei Kohorten. AE: alte Erwachsene; Führungsschritt: Schwungphase, in der sich das Führungsbein über dem Hindernis befindet; Folgeschritt: Phase, in der sich das Folgebein über dem Hindernis befindet; IPS: idiopathisches Parkinsonsyndrom; JE: junge Erwachsene. _____ 42

Literaturverzeichnis

- [1] J. Parkinson, "An essay on the shaking palsy. 1817," *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci.*, vol. 14, no. 2, pp. 222–223, 2002, doi: 10.1176/jnp.14.2.223.
- [2] J. A. Obeso *et al.*, "Past, present, and future of Parkinson's disease: A special essay on the 200th Anniversary of the Shaking Palsy," *Mov. Disord.*, vol. 32, no. 9, pp. 1264–1310, 2017, doi: 10.1002/mds.27115.
- [3] K. Sen and R. Bonita, "Global health status: two steps forward, one step back," *Lancet*, vol. 356, no. 9229, pp. 577–582, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0140-6736(00)02590-3.
- [4] L. M. L. de Lau, P. C. L. M. Giesbergen, M. C. de Rijk, A. Hofman, P. J. Koudstaal, and M. M. B. Breteler, "Incidence of parkinsonism and Parkinson disease in a general population," *Neurology*, vol. 63, no. 7, pp. 1240 LP – 1244, Oct. 2004, doi: 10.1212/01.WNL.0000140706.52798.BE.
- [5] E. R. Dorsey *et al.*, "Projected number of people with Parkinson disease in the most populous nations, 2005 through 2030," *Neurology*, vol. 68, no. 5, pp. 384 LP – 386, Jan. 2007, doi: 10.1212/01.wnl.0000247740.47667.03.
- [6] M. C. de Rijk *et al.*, "Prevalence of parkinsonism and Parkinson's disease in Europe: the EUROPARKINSON Collaborative Study. European Community Concerted Action on the Epidemiology of Parkinson's disease," *J. Neurol. Neurosurg. & Psychiatry*, vol. 62, no. 1, pp. 10 LP – 15, Jan. 1997, doi: 10.1136/jnnp.62.1.10.
- [7] D. Twelves, K. S. M. Perkins, and C. Counsell, "Systematic review of incidence studies of Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 18, no. 1, pp. 19–31, Jan. 2003, doi: 10.1002/mds.10305.
- [8] O.-B. Tysnes and A. Storstein, "Epidemiology of Parkinson's disease," *J. Neural Transm.*, vol. 124, no. 8, pp. 901–905, 2017, doi: 10.1007/s00702-017-1686-y.
- [9] S. K. Van Den Eeden *et al.*, "Incidence of Parkinson's disease: variation by age, gender, and race/ethnicity," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 157, no. 11, pp. 1015–1022, Jun. 2003, doi: 10.1093/aje/kwg068.
- [10] M. C. Rodriguez-Oroz *et al.*, "Initial clinical manifestations of Parkinson's disease: features and pathophysiological mechanisms," *Lancet Neurol.*, vol. 8, no. 12, pp. 1128–1139, Dec. 2009, doi: 10.1016/S1474-4422(09)70293-5.
- [11] P. D. M. Gerlach *et al.*, *Die Parkinson-Krankheit Grundlagen, Klinik, Therapie.* .
- [12] D. Berg *et al.*, "Movement disorder society criteria for clinically established early Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 33, no. 10, pp. 1643–1646, 2018, doi: 10.1002/mds.27431.
- [13] A. L. Bartels and K. L. Leenders, "Parkinson's disease: The syndrome, the pathogenesis and pathophysiology," *Cortex*, vol. 45, no. 8, pp. 915–921, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.11.010>.
- [14] J. Jankovic, "Parkinson's disease: clinical features and diagnosis," *J. Neurol. Neurosurg. & Psychiatry*, vol. 79, no. 4, pp. 368 LP – 376, Apr. 2008, doi: 10.1136/jnnp.2007.131045.
- [15] M. E. Morris, R. Iansek, T. A. Matyas, and J. J. Summers, "The pathogenesis of gait hypokinesia in Parkinson's disease," *Brain*, vol. 117, no. 5, pp. 1169–1181, Oct. 1994, doi: 10.1093/brain/117.5.1169.
- [16] D. S. Peterson and F. B. Horak, "Neural Control of Walking in People with Parkinsonism," *Physiology*, vol. 31, no. 2, pp. 95–107, Feb. 2016, doi: 10.1152/physiol.00034.2015.
- [17] S. Sveinbjornsdottir, "The clinical symptoms of Parkinson's disease," *J. Neurochem.*, vol. 139, no. S1, pp. 318–324, Oct. 2016, doi: 10.1111/jnc.13691.
- [18] M. Hallett, "Parkinson's disease tremor: pathophysiology," *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 18, pp. S85–S86, 2012, doi: [https://doi.org/10.1016/S1353-8020\(11\)70027-X](https://doi.org/10.1016/S1353-8020(11)70027-X).
- [19] R. Cano-de-la-Cuerda, L. Vela-Desojo, J. C. Miangolarra-Page, Y. Macías-Macías, and E. Muñoz-Hellín, "Axial rigidity and quality of life in patients with Parkinson's disease: a preliminary

- study," *Qual. Life Res.*, vol. 20, no. 6, pp. 817–823, 2011, doi: 10.1007/s11136-010-9818-y.
- [20] N. Baradaran *et al.*, "Parkinson's disease rigidity: relation to brain connectivity and motor performance," *Front. Neurol.*, vol. 4, p. 67, Jun. 2013, doi: 10.3389/fneur.2013.00067.
- [21] A. Zeyfang, U. Hagg-Grün, and T. Nikolaus, *Basiswissen Medizin des Alterns und des alten Menschen*. Springer Berlin Heidelberg.
- [22] E. Warmerdam, R. Romijnders, J. Welzel, C. Hansen, G. Schmidt, and W. Maetzler, "Quantification of Arm Swing during Walking in Healthy Adults and Parkinson's Disease Patients: Wearable Sensor-Based Algorithm Development and Validation," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 20, p. 5963, Oct. 2020, doi: 10.3390/s20205963.
- [23] S. Mesure, J. P. Azulay, J. Pouget, and B. Amblard, "Strategies of segmental stabilization during gait in Parkinson's disease," *Exp. Brain Res.*, vol. 129, no. 4, pp. 573–581, 1999, doi: 10.1007/s002210050927.
- [24] W.-C. Yang, W.-L. Hsu, R.-M. Wu, T.-W. Lu, and K.-H. Lin, "Motion analysis of axial rotation and gait stability during turning in people with Parkinson's disease," *Gait Posture*, vol. 44, pp. 83–88, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.10.023>.
- [25] R. E. Van Emmerik, R. C. Wagenaar, A. Winogrodzka, and E. C. Wolters, "Identification of axial rigidity during locomotion in Parkinson disease.," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 80, no. 2, pp. 186–191, Feb. 1999, doi: 10.1016/s0003-9993(99)90119-3.
- [26] S. Rinalduzzi *et al.*, "Balance Dysfunction in Parkinson's Disease," *Biomed Res. Int.*, vol. 2015, p. 434683, 2015, doi: 10.1155/2015/434683.
- [27] K. M. Doherty *et al.*, "Postural deformities in Parkinson's disease," *Lancet Neurol.*, vol. 10, no. 6, pp. 538–549, 2011, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(11\)70067-9](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(11)70067-9).
- [28] A. L. Forsyth, R. Y. Joshi, C. G. Canning, N. E. Allen, and S. S. Paul, "Flexed Posture in Parkinson Disease: Associations With Nonmotor Impairments and Activity Limitations," *Phys. Ther.*, vol. 99, no. 7, pp. 893–903, Jul. 2019, doi: 10.1093/ptj/pzz033.
- [29] M. D. Latt, S. R. Lord, J. G. L. Morris, and V. S. C. Fung, "Clinical and physiological assessments for elucidating falls risk in Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 24, no. 9, pp. 1280–1289, Jul. 2009, doi: 10.1002/mds.22561.
- [30] D. Saha, S. Gard, and S. Fatone, "The effect of trunk flexion on able-bodied gait," *Gait Posture*, vol. 27, no. 4, pp. 653–660, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.08.009>.
- [31] H.-Y. Park *et al.*, "Spinal Surgery for Parkinson Disease With Camptocormia: Propensity Score-Matched Cohort Study With Degenerative Sagittal Imbalance (DSI)," *Clin. Spine Surg.*, vol. 33, no. 10, 2020.
- [32] S. Liang, Y. Yu, H. Li, Y. Wang, Y. Cheng, and H. Yang, "The Study of Subthalamic Deep Brain Stimulation for Parkinson Disease-Associated Camptocormia," *Med. Sci. Monit.*, vol. 26, pp. e919682–e919682, Mar. 2020, doi: 10.12659/MSM.919682.
- [33] N. G. Margraf, A. Wrede, G. Deuschl, and W. J. Schulz-Schaeffer, "Pathophysiological Concepts and Treatment of Camptocormia," *J. Parkinsons. Dis.*, vol. 6, no. 3, pp. 485–501, Jun. 2016, doi: 10.3233/JPD-160836.
- [34] M. Morris, R. Iansek, F. Smithson, and F. Huxham, "Postural instability in Parkinson's disease: a comparison with and without a concurrent task," *Gait Posture*, vol. 12, no. 3, pp. 205–216, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00076-X).
- [35] T. Perera *et al.*, "Balance control systems in Parkinson's disease and the impact of pedunculopontine area stimulation," *Brain*, vol. 141, no. 10, pp. 3009–3022, Aug. 2018, doi: 10.1093/brain/awy216.
- [36] M. A. Hely *et al.*, "The Sydney Multicentre Study of Parkinson's disease: a report on the first 3 years.," *J. Neurol. Neurosurg. & Psychiatry*, vol. 52, no. 3, pp. 324 LP – 328, Mar. 1989, doi: 10.1136/jnnp.52.3.324.
- [37] M. A. Hely, J. G. L. Morris, W. G. J. Reid, and R. Trafficante, "Sydney multicenter study of Parkinson's disease: Non-L-dopa-responsive problems dominate at 15 years," *Mov. Disord.*, vol. 20, no. 2, pp. 190–199, Feb. 2005, doi: 10.1002/mds.20324.
- [38] A. Schrag, L. Horsfall, K. Walters, A. Noyce, and I. Petersen, "Prediagnostic presentations of Parkinson's disease in primary care: a case-control study," *Lancet Neurol.*, vol. 14, no. 1, pp.

- 57–64, 2015, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(14\)70287-X](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(14)70287-X).
- [39] D. T. Wade, H. Gage, C. Owen, P. Trend, C. Grossmith, and J. Kaye, “Multidisciplinary rehabilitation for people with Parkinson’s disease: a randomised controlled study,” *J. Neurol. Neurosurg. & Psychiatry*, vol. 74, no. 2, pp. 158 LP – 162, Feb. 2003, doi: 10.1136/jnnp.74.2.158.
- [40] S. D. Kim, N. E. Allen, C. G. Canning, and V. S. C. Fung, “Postural Instability in Patients with Parkinson’s Disease,” *CNS Drugs*, vol. 27, no. 2, pp. 97–112, 2013, doi: 10.1007/s40263-012-0012-3.
- [41] N. N. W. Dissanayaka *et al.*, “Anxiety disorders in Parkinson’s disease: Prevalence and risk factors,” *Mov. Disord.*, vol. 25, no. 7, pp. 838–845, May 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/mds.22833>.
- [42] J. Nonnekes, R. Goselink, V. Weerdesteyn, and B. R. Bloem, “The Retropulsion Test: A Good Evaluation of Postural Instability in Parkinson’s Disease?,” *J. Parkinsons. Dis.*, vol. 5, pp. 43–47, 2015, doi: 10.3233/JPD-140514.
- [43] J. V Jacobs, F. B. Horak, K. Van Tran, and J. G. Nutt, “An alternative clinical postural stability test for patients with Parkinson’s disease,” *J. Neurol.*, vol. 253, no. 11, pp. 1404–1413, 2006, doi: 10.1007/s00415-006-0224-x.
- [44] R. P. Munhoz *et al.*, “Evaluation of the pull test technique in assessing postural instability in Parkinson’s disease,” *Neurology*, vol. 62, no. 1, pp. 125 LP – 127, Jan. 2004, doi: 10.1212/WNL.62.1.125.
- [45] C. J. Hass *et al.*, “Quantitative Normative Gait Data in a Large Cohort of Ambulatory Persons with Parkinson’s Disease,” *PLoS One*, vol. 7, no. 8, p. e42337, Aug. 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0042337.
- [46] J. D. Schaafsma, N. Giladi, Y. Balash, A. L. Bartels, T. Gurevich, and J. M. Hausdorff, “Gait dynamics in Parkinson’s disease: relationship to Parkinsonian features, falls and response to levodopa,” *J. Neurol. Sci.*, vol. 212, no. 1, pp. 47–53, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-510X\(03\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0022-510X(03)00104-7).
- [47] M. E. Morris, R. Iansek, T. A. Matyas, and J. J. Summers, “Stride length regulation in Parkinson’s disease: Normalization strategies and underlying mechanisms,” *Brain*, vol. 119, no. 2, pp. 551–568, Apr. 1996, doi: 10.1093/brain/119.2.551.
- [48] L. Alcock, B. Galna, S. Lord, and L. Rochester, “Characterisation of foot clearance during gait in people with early Parkinson’s disease: Deficits associated with a dual task,” *J. Biomech.*, vol. 49, no. 13, pp. 2763–2769, 2016, doi: 10.1016/j.jbiomech.2016.06.007.
- [49] M. Ghislieri, V. Agostini, L. Rizzi, M. Knaflitz, and M. Lanotte, “Atypical Gait Cycles in Parkinson’s Disease,” *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 15, p. 5079, Jul. 2021, doi: 10.3390/s21155079.
- [50] M. A. Hobert, W. Maetzler, and C. Schlenstedt, “Does increased forefoot load contribute to freezing of gait in Parkinson’s disease? A clinical observation,” *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 77, pp. 83–84, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.parkreldis.2020.06.021.
- [51] K. A. Lowry, A. L. Smiley-Oyen, A. J. Carrel, and J. P. Kerr, “Walking stability using harmonic ratios in Parkinson’s disease,” *Mov. Disord.*, vol. 24, no. 2, pp. 261–267, Jan. 2009, doi: 10.1002/mds.22352.
- [52] R. Baltadjieva, N. Giladi, L. Gruendlinger, C. Peretz, and J. M. Hausdorff, “Marked alterations in the gait timing and rhythmicity of patients with de novo Parkinson’s disease,” *Eur. J. Neurosci.*, vol. 24, no. 6, pp. 1815–1820, Sep. 2006, doi: 10.1111/j.1460-9568.2006.05033.x.
- [53] J. M. Hausdorff, J. D. Schaafsma, Y. Balash, A. L. Bartels, T. Gurevich, and N. Giladi, “Impaired regulation of stride variability in Parkinson’s disease subjects with freezing of gait,” *Exp. Brain Res.*, vol. 149, no. 2, pp. 187–194, 2003, doi: 10.1007/s00221-002-1354-8.
- [54] R. M. Lamont, M. E. Morris, M. H. Woollacott, and S. G. Brauer, “Community Walking in People with Parkinson’s Disease,” *Park. Dis.*, vol. 2012, p. 856237, 2012, doi: 10.1155/2012/856237.
- [55] J. G. Nutt, B. R. Bloem, N. Giladi, M. Hallett, F. B. Horak, and A. Nieuwboer, “Freezing of gait: moving forward on a mysterious clinical phenomenon,” *Lancet Neurol.*, vol. 10, no. 8, pp.

- 734–744, 2011, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(11\)70143-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(11)70143-0).
- [56] B. R. Bloem, J. M. Hausdorff, J. E. Visser, and N. Giladi, "Falls and freezing of gait in Parkinson's disease: A review of two interconnected, episodic phenomena," *Mov. Disord.*, vol. 19, no. 8, pp. 871–884, Aug. 2004, doi: 10.1002/mds.20115.
- [57] G. K. Kerr, C. J. Worringham, M. H. Cole, P. F. Lacherez, J. M. Wood, and P. A. Silburn, "Predictors of future falls in Parkinson disease," *Neurology*, vol. 75, no. 2, pp. 116 LP – 124, Jul. 2010, doi: 10.1212/WNL.0b013e3181e7b688.
- [58] B. R. Bloem, Y. A. M. Grimbergen, M. Cramer, M. Willemsen, and A. H. Zwinderman, "Prospective assessment of falls in Parkinson's disease," *J. Neurol.*, vol. 248, no. 11, pp. 950–958, 2001, doi: 10.1007/s004150170047.
- [59] W. C. Roller, S. Glatt, B. Vetere-Overfield, and R. Hassanein, "Falls and Parkinson's Disease," *Clin. Neuropharmacol.*, vol. 12, no. 2, 1989.
- [60] A. Schrag, Y. Ben-Shlomo, and N. Quinn, "How common are complications of Parkinson's disease?," *J. Neurol.*, vol. 249, no. 4, pp. 419–423, 2002, doi: 10.1007/s004150200032.
- [61] B. H. Wood, J. A. Bilclough, A. Bowron, and R. W. Walker, "Incidence and prediction of falls in Parkinson's disease: a prospective multidisciplinary study," *J. Neurol. Neurosurg. & Psychiatry*, vol. 72, no. 6, pp. 721 LP – 725, Jun. 2002, doi: 10.1136/jnnp.72.6.721.
- [62] M. A. Hely, W. G. J. Reid, M. A. Adena, G. M. Halliday, and J. G. L. Morris, "The Sydney multicenter study of Parkinson's disease: The inevitability of dementia at 20 years," *Mov. Disord.*, vol. 23, no. 6, pp. 837–844, Apr. 2008, doi: 10.1002/mds.21956.
- [63] L. Koay, J. Rose, and A. H. Abdelhafiz, "Factors that lead to hospitalisation in patients with Parkinson disease—A systematic review," *Int. J. Clin. Pract.*, vol. 72, no. 1, p. e13039, Jan. 2018, doi: 10.1111/ijcp.13039.
- [64] H. Stolze, S. Klebe, C. Zechlin, C. Baecker, L. Friege, and G. Deuschl, "Falls in frequent neurological diseases," *J. Neurol.*, vol. 251, no. 1, pp. 79–84, 2004, doi: 10.1007/s00415-004-0276-8.
- [65] O. JOHNELL, L. J. MELTON III, E. J. ATKINSON, W. M. O'FALLON, and L. T. KURLAND, "Fracture Risk in Patients with Parkinsonism: A Population-based Study in Olmsted County, Minnesota," *Age Ageing*, vol. 21, no. 1, pp. 32–38, Jan. 1992, doi: 10.1093/ageing/21.1.32.
- [66] M. Braga, M. Pederzoli, A. Antonini, F. Beretta, and V. Crespi, "Reasons for hospitalization in Parkinson's disease: A case-control study," *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 20, no. 5, pp. 488–492, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2014.01.022>.
- [67] M. A. Hely, J. G. L. Morris, R. Traficante, W. G. J. Reid, D. J. O'Sullivan, and P. M. Williamson, "The Sydney multicentre study of Parkinson's disease: progression and mortality at 10 years," *J. Neurol. Neurosurg. & Psychiatry*, vol. 67, no. 3, pp. 300 LP – 307, Sep. 1999, doi: 10.1136/jnnp.67.3.300.
- [68] M. Meyer, "Assoziation des vestibulo-okulären Reflexes und dessen Suppression mit Sturzrisiko bei älteren Personen und neurodegenerativ erkrankten Personen."
- [69] M. S. Karadshah, M. Weaver, K. Rodriguez, M. Harris, D. Zurakowski, and R. Lucas, "Mortality and Revision Surgery Are Increased in Patients With Parkinson's Disease and Fractures of the Femoral Neck," *Clin. Orthop. Relat. Res.*, vol. 473, no. 10, pp. 3272–3279, 2015, doi: 10.1007/s11999-015-4262-5.
- [70] M. Matinoli, J. T. Korpelainen, R. Korpelainen, K. A. Sotaniemi, M. Virranniemi, and V. V. Myllylä, "Postural sway and falls in Parkinson's disease: A regression approach," *Mov. Disord.*, vol. 22, no. 13, pp. 1927–1935, Oct. 2007, doi: 10.1002/mds.21633.
- [71] A. L. Adkin, J. S. Frank, and M. S. Jog, "Fear of falling and postural control in Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 18, no. 5, pp. 496–502, May 2003, doi: 10.1002/mds.10396.
- [72] R. M. Pickering *et al.*, "A meta-analysis of six prospective studies of falling in Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 22, no. 13, pp. 1892–1900, Oct. 2007, doi: 10.1002/mds.21598.
- [73] G. K. Wenning *et al.*, "Progression of falls in postmortem-confirmed Parkinsonian disorders," *Mov. Disord.*, vol. 14, no. 6, pp. 947–950, Nov. 1999, doi: 10.1002/1531-8257(199911)14:6<947::AID-MDS1006>3.0.CO;2-O.
- [74] M. D. Latt, H. B. Menz, V. S. Fung, and S. R. Lord, "Acceleration Patterns of the Head and Pelvis

- During Gait in Older People With Parkinson's Disease: A Comparison of Fallers and Nonfallers," *Journals Gerontol. Ser. A*, vol. 64A, no. 6, pp. 700–706, Feb. 2009, doi: 10.1093/gerona/glp009.
- [75] M. K. Viitasalo, V. Kampman, K. A. Sotaniemi, S. Leppävuori, V. V. Myllylä, and J. T. Korpelainen, "Analysis of sway in Parkinson's disease using a new inclinometry-based method," *Mov. Disord.*, vol. 17, no. 4, pp. 663–669, Jul. 2002, doi: 10.1002/mds.10023.
- [76] S. S. O'Sullivan, D. R. Williams, D. A. Gallagher, L. A. Massey, L. Silveira-Moriyama, and A. J. Lees, "Nonmotor symptoms as presenting complaints in Parkinson's disease: A clinicopathological study," *Mov. Disord.*, vol. 23, no. 1, pp. 101–106, 2008, doi: 10.1002/mds.21813.
- [77] J. A. Temlett and P. D. Thompson, "Reasons for admission to hospital for Parkinson's disease," *Intern. Med. J.*, vol. 36, no. 8, pp. 524–526, Aug. 2006, doi: 10.1111/j.1445-5994.2006.01123.x.
- [78] A. Q. Rana, U. S. Ahmed, Z. M. Chaudry, and S. Vasan, "Parkinson's disease: a review of non-motor symptoms," *Expert Rev. Neurother.*, vol. 15, no. 5, pp. 549–562, May 2015, doi: 10.1586/14737175.2015.1038244.
- [79] I. Liepelt-Scarfone *et al.*, "Cognitive Profiles in Parkinson's Disease and Their Relation to Dementia: A Data-Driven Approach," *Int. J. Alzheimer's Dis.*, vol. 2012, p. 910757, 2012, doi: 10.1155/2012/910757.
- [80] T. Foltynie, C. E. G. Brayne, T. W. Robbins, and R. A. Barker, "The cognitive ability of an incident cohort of Parkinson's patients in the UK. The CamPaIGN study," *Brain*, vol. 127, no. 3, pp. 550–560, Mar. 2004, doi: 10.1093/brain/awh067.
- [81] K. F. Pedersen, J. P. Larsen, G. Alves, and D. Aarsland, "Prevalence and clinical correlates of apathy in Parkinson's disease: A community-based study," *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 15, no. 4, pp. 295–299, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2008.07.006>.
- [82] "The biomechanics and motor control of gait in Parkinson disease - ScienceDirect." [Online]. Available: <https://vpn.uni-kiel.de/proxy/11fc1f99/https/www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268003301000353>. [Accessed: 12-Mar-2020].
- [83] L. Arie, T. Herman, S. Shema-Shiratzky, N. Giladi, and J. M. Hausdorff, "Do cognition and other non-motor symptoms decline similarly among patients with Parkinson's disease motor subtypes? Findings from a 5-year prospective study," *J. Neurol.*, vol. 264, no. 10, pp. 2149–2157, 2017, doi: 10.1007/s00415-017-8605-x.
- [84] K. Pigott *et al.*, "Longitudinal study of normal cognition in Parkinson disease," *Neurology*, vol. 85, no. 15, pp. 1276 LP – 1282, Oct. 2015, doi: 10.1212/WNL.0000000000002001.
- [85] K. Marder *et al.*, "Are demented patients with Parkinson's disease accurately reflected in prevalence surveys? A survival analysis," *Neurology*, vol. 41, no. 8, pp. 1240 LP – 1240, Aug. 1991, doi: 10.1212/WNL.41.8.1240.
- [86] J. L. W. Bosboom, D. Stoffers, and E. C. Wolters, "Cognitive dysfunction and dementia in Parkinson's disease," *J. Neural Transm.*, vol. 111, no. 10, pp. 1303–1315, 2004, doi: 10.1007/s00702-004-0168-1.
- [87] Y.-X. Wang *et al.*, "Associations between cognitive impairment and motor dysfunction in Parkinson's disease," *Brain Behav.*, vol. 7, no. 6, p. e00719, Jun. 2017, doi: 10.1002/brb3.719.
- [88] J. K. Kueper, M. Speechley, N. R. Lingum, and M. Montero-Odasso, "Motor function and incident dementia: a systematic review and meta-analysis," *Age Ageing*, vol. 46, no. 5, pp. 729–738, May 2017, doi: 10.1093/ageing/afx084.
- [89] N. M. F. Sousa and R. C. Macedo, "Relationship between cognitive performance and mobility in patients with Parkinson's disease: A cross-sectional study," *Dement. Neuropsychol.*, vol. 13, no. 4, pp. 403–409, 2019, doi: 10.1590/1980-57642018dn13-040006.
- [90] L. B. Wild *et al.*, "Characterization of cognitive and motor performance during dual-tasking in healthy older adults and patients with Parkinson's disease," *J. Neurol.*, vol. 260, no. 2, pp. 580–589, 2013, doi: 10.1007/s00415-012-6683-3.
- [91] T. Sharon *et al.*, "Which obstacle attributes place additional demands on higher-level

- cognitive function in patients with Parkinson's disease?," *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 78, pp. 178–183, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2020.08.002>.
- [92] A. Schrag and R. N. Taddei, "Depression and Anxiety in Parkinson's Disease.," *Int. Rev. Neurobiol.*, vol. 133, pp. 623–655, 2017, doi: 10.1016/bs.irn.2017.05.024.
- [93] D. Aarsland and M. G. Kramberger, "Neuropsychiatric Symptoms in Parkinson's Disease," *J. Parkinsons. Dis.*, vol. 5, pp. 659–667, 2015, doi: 10.3233/JPD-150604.
- [94] J. S. A. M. Reijnders, U. Ehrt, W. E. J. Weber, D. Aarsland, and A. F. G. Leentjens, "A systematic review of prevalence studies of depression in Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 23, no. 2, pp. 183–189, Jan. 2008, doi: 10.1002/mds.21803.
- [95] D. Weintraub, P. J. Moberg, J. E. Duda, I. R. Katz, and M. B. Stern, "Recognition and Treatment of Depression in Parkinson's Disease," *J. Geriatr. Psychiatry Neurol.*, vol. 16, no. 3, pp. 178–183, Sep. 2003, doi: 10.1177/0891988703256053.
- [96] L. M. Shulman, R. L. Taback, A. A. Rabinstein, and W. J. Weiner, "Non-recognition of depression and other non-motor symptoms in Parkinson's disease," *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 8, no. 3, pp. 193–197, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S1353-8020\(01\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S1353-8020(01)00015-3).
- [97] L. Avanzino, G. Lagravinese, G. Abbruzzese, and E. Pelosin, "Relationships between gait and emotion in Parkinson's disease: A narrative review," *Gait Posture*, vol. 65, pp. 57–64, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.06.171>.
- [98] Y. Kim, S.-M. Cheon, C. Youm, M. Son, and J. W. Kim, "Depression and posture in patients with Parkinson's disease," *Gait Posture*, vol. 61, pp. 81–85, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.12.026>.
- [99] S. G. Lutz, J. D. Holmes, E. A. Ready, M. E. Jenkins, and A. M. Johnson, "Clinical Presentation of Anxiety in Parkinson's Disease: A Scoping Review," *OTJR Occup. Particip. Heal.*, vol. 36, no. 3, pp. 134–147, Jul. 2016, doi: 10.1177/1539449216661714.
- [100] M. G. H. E. den Brok, J. W. van Dalen, W. A. van Gool, E. P. Moll van Charante, R. M. A. de Bie, and E. Richard, "Apathy in Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis," *Mov. Disord.*, vol. 30, no. 6, pp. 759–769, May 2015, doi: 10.1002/mds.26208.
- [101] M. L. Levy *et al.*, "Apathy Is Not Depression," *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci.*, vol. 10, no. 3, pp. 314–319, Aug. 1998, doi: 10.1176/jnp.10.3.314.
- [102] K. F. Pedersen, G. Alves, K. Brønneck, D. Aarsland, O.-B. Tysnes, and J. P. Larsen, "Apathy in drug-naïve patients with incident Parkinson's disease: the Norwegian ParkWest study," *J. Neurol.*, vol. 257, no. 2, pp. 217–223, 2010, doi: 10.1007/s00415-009-5297-x.
- [103] M. Siciliano, L. Trojano, G. Santangelo, R. De Micco, G. Tedeschi, and A. Tessitore, "Fatigue in Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis," *Mov. Disord.*, vol. 33, no. 11, pp. 1712–1723, Nov. 2018, doi: 10.1002/mds.27461.
- [104] K. R. Chaudhuri, D. G. Healy, and A. H. V Schapira, "Non-motor symptoms of Parkinson's disease: diagnosis and management," *Lancet Neurol.*, vol. 5, no. 3, pp. 235–245, 2006, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(06\)70373-8](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(06)70373-8).
- [105] F. A. Barbieri, P. C. R. dos Santos, L. Simieli, D. Orcioli-Silva, J. H. van Dieën, and L. T. B. Gobbi, "Interactions of age and leg muscle fatigue on unobstructed walking and obstacle crossing," *Gait Posture*, vol. 39, no. 3, pp. 985–990, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.12.021>.
- [106] B. Lindholm, P. Hagell, O. Hansson, and M. H. Nilsson, "Factors associated with fear of falling in people with Parkinson's disease," *BMC Neurol.*, vol. 14, no. 1, p. 19, 2014, doi: 10.1186/1471-2377-14-19.
- [107] M. Nallegowda *et al.*, "Role of Sensory Input and Muscle Strength in Maintenance of Balance, Gait, and Posture in Parkinson's Disease: A Pilot Study," *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 83, no. 12, 2004.
- [108] A. Romagnolo *et al.*, "Cardiovascular autonomic neuropathy and falls in Parkinson disease: a prospective cohort study," *J. Neurol.*, vol. 266, no. 1, pp. 85–91, 2019, doi: 10.1007/s00415-018-9104-4.

- [109] A. Merola *et al.*, "Autonomic dysfunction in Parkinson's disease: A prospective cohort study," *Mov. Disord.*, vol. 33, no. 3, pp. 391–397, Mar. 2018, doi: 10.1002/mds.27268.
- [110] L. Veys *et al.*, "Retinal α -synuclein deposits in Parkinson's disease patients and animal models," *Acta Neuropathol.*, vol. 137, no. 3, pp. 379–395, 2019, doi: 10.1007/s00401-018-01956-z.
- [111] N. J. Diederich, R. Raman, S. Leurgans, and C. G. Goetz, "Progressive Worsening of Spatial and Chromatic Processing Deficits in Parkinson Disease," *Arch. Neurol.*, vol. 59, no. 8, pp. 1249–1252, Aug. 2002, doi: 10.1001/archneur.59.8.1249.
- [112] R. A. Armstrong, "Oculo-Visual Dysfunction in Parkinson's Disease," *J. Parkinsons. Dis.*, vol. 5, pp. 715–726, 2015, doi: 10.3233/JPD-150686.
- [113] G. Alves, E. B. Forsaa, K. F. Pedersen, M. Dreetz Gjerstad, and J. P. Larsen, "Epidemiology of Parkinson's disease," *J. Neurol.*, vol. 255, no. 5, pp. 18–32, 2008, doi: 10.1007/s00415-008-5004-3.
- [114] L. Marsili, G. Rizzo, and C. Colosimo, "Diagnostic Criteria for Parkinson's Disease: From James Parkinson to the Concept of Prodromal Disease," *Front. Neurol.*, vol. 9, p. 156, Mar. 2018, doi: 10.3389/fneur.2018.00156.
- [115] I. Litvan *et al.*, "SIC Task Force appraisal of clinical diagnostic criteria for parkinsonian disorders," *Mov. Disord.*, vol. 18, no. 5, pp. 467–486, May 2003, doi: 10.1002/mds.10459.
- [116] P. D. P. Berlit, *Basiswissen Neurologie*. Springer Berlin Heidelberg.
- [117] C. Scherfler *et al.*, "Role of DAT-SPECT in the diagnostic work up of Parkinsonism," *Mov. Disord.*, vol. 22, no. 9, pp. 1229–1238, Jul. 2007, doi: 10.1002/mds.21505.
- [118] P. Riederer, K. A. Jellinger, P. Kolber, G. Hipp, J. Sian-Hülsmann, and R. Krüger, "Lateralisation in Parkinson disease," *Cell Tissue Res.*, vol. 373, no. 1, pp. 297–312, 2018, doi: 10.1007/s00441-018-2832-z.
- [119] D.-H. Li, Y.-C. He, J. Liu, and S.-D. Chen, "Diagnostic Accuracy of Transcranial Sonography of the Substantia Nigra in Parkinson's disease: A Systematic Review and Meta-analysis," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 20863, 2016, doi: 10.1038/srep20863.
- [120] A. Tao, G. Chen, Y. Deng, and R. Xu, "Accuracy of Transcranial Sonography of the Substantia Nigra for Detection of Parkinson's Disease: A Systematic Review and Meta-analysis," *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 45, no. 3, pp. 628–641, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2018.11.010.
- [121] J. J. Chen and D. M. Swope, "Pharmacotherapy for Parkinson's Disease," *Pharmacother. J. Hum. Pharmacol. Drug Ther.*, vol. 27, no. 12P2, pp. 161S-173S, Dec. 2007, doi: 10.1592/phco.27.12part2.161S.
- [122] S. Müller-Rebstein, C. Trenkwalder, W. H. Oertel, C. Culmsee, G. Eckermann, and G. U. Höglinger, "Pharmakotherapie des Morbus Parkinson," *Nervenarzt*, vol. 88, no. 8, pp. 888–894, 2017, doi: 10.1007/s00115-017-0345-8.
- [123] A. Diamond and J. Jankovic, "Treatment of advanced Parkinson's disease," *Expert Rev. Neurother.*, vol. 6, no. 8, pp. 1181–1197, Aug. 2006, doi: 10.1586/14737175.6.8.1181.
- [124] J. Jankovic, "Levodopa strengths and weaknesses," *Neurology*, vol. 58, no. suppl 1, p. S19 LP-S32, Feb. 2002, doi: 10.1212/WNL.58.suppl_1.S19.
- [125] C. Curtze, J. G. Nutt, P. Carlson-Kuhta, M. Mancini, and F. B. Horak, "Levodopa Is a Double-Edged Sword for Balance and Gait in People With Parkinson's Disease," *Mov. Disord.*, vol. 30, no. 10, pp. 1361–1370, Sep. 2015, doi: 10.1002/mds.26269.
- [126] C. Vitale *et al.*, "Effect of Global Postural Rehabilitation program on spatiotemporal gait parameters of parkinsonian patients: a three-dimensional motion analysis study," *Neurol. Sci.*, vol. 33, no. 6, pp. 1337–1343, 2012, doi: 10.1007/s10072-012-1202-y.
- [127] V. Weerdesteyn, H. Rijken, A. C. H. Geurts, B. C. M. Smits-Engelsman, T. Mulder, and J. Duysens, "A Five-Week Exercise Program Can Reduce Falls and Improve Obstacle Avoidance in the Elderly," *Gerontology*, vol. 52, no. 3, pp. 131–141, 2006, doi: 10.1159/000091822.
- [128] E. Moro and A. E. Lang, "Criteria for deep-brain stimulation in Parkinson's disease: review and analysis," *Expert Rev. Neurother.*, vol. 6, no. 11, pp. 1695–1705, Nov. 2006, doi: 10.1586/14737175.6.11.1695.

- [129] “Deep-Brain Stimulation for Parkinson’s Disease,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 368, no. 5, pp. 482–484, Jan. 2013, doi: 10.1056/NEJMc1214078.
- [130] K. Jahn, A. Zwergal, and R. Schniepp, “Gait disturbances in old age: classification, diagnosis, and treatment from a neurological perspective,” *Dtsch. Arztebl. Int.*, vol. 107, no. 17, pp. 306–316, Apr. 2010, doi: 10.3238/arztebl.2010.0306.
- [131] P. Mahlknecht *et al.*, “Prevalence and burden of gait disorders in elderly men and women aged 60-97 years: a population-based study,” *PLoS One*, vol. 8, no. 7, pp. e69627–e69627, Jul. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0069627.
- [132] R. Liston, J. Mickelborough, J. Bene, and R. Tallis, “A new classification of higher level gait disorders in patients with cerebral multi-infarct states,” *Age Ageing*, vol. 32, no. 3, pp. 252–258, May 2003, doi: 10.1093/ageing/32.3.252.
- [133] W. Pirker and R. Katzenschlager, “Gait disorders in adults and the elderly,” *Wien. Klin. Wochenschr.*, vol. 129, no. 3, pp. 81–95, 2017, doi: 10.1007/s00508-016-1096-4.
- [134] H. VISSER, “GAIT AND BALANCE IN SENILE DEMENTIA OF ALZHEIMER’S TYPE,” *Age Ageing*, vol. 12, no. 4, pp. 296–301, Nov. 1983, doi: 10.1093/ageing/12.4.296.
- [135] T. Liu-Ambrose, L. S. Nagamatsu, P. Graf, B. L. Beattie, M. C. Ashe, and T. C. Handy, “Resistance training and executive functions: a 12-month randomized controlled trial,” *Arch. Intern. Med.*, vol. 170, no. 2, pp. 170–178, Jan. 2010, doi: 10.1001/archinternmed.2009.494.
- [136] M. E. Hahn and L.-S. Chou, “Age-related reduction in sagittal plane center of mass motion during obstacle crossing,” *J. Biomech.*, vol. 37, no. 6, pp. 837–844, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2003.11.010>.
- [137] J. Verghese, A. LeValley, C. B. Hall, M. J. Katz, A. F. Ambrose, and R. B. Lipton, “Epidemiology of Gait Disorders in Community-Residing Older Adults.”
- [138] S. Studenski *et al.*, “Gait speed and survival in older adults,” *JAMA*, vol. 305, no. 1, pp. 50–58, Jan. 2011, doi: 10.1001/jama.2010.1923.
- [139] M. M. Mielke *et al.*, “Assessing the temporal relationship between cognition and gait: slow gait predicts cognitive decline in the Mayo Clinic Study of Aging,” *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, vol. 68, no. 8, pp. 929–937, Aug. 2013, doi: 10.1093/gerona/gls256.
- [140] J. Verghese *et al.*, “Motoric cognitive risk syndrome: multicountry prevalence and dementia risk,” *Neurology*, vol. 83, no. 8, pp. 718–726, Aug. 2014, doi: 10.1212/WNL.0000000000000717.
- [141] P. E. Magnani, R. C. Freire Junior, N. F. G. Zanellato, M. B. Genovez, I. C. Alvarenga, and D. C. C. de Abreu, “The influence of aging on the spatial and temporal variables of gait during usual and fast speeds in older adults aged 60 to 102 years,” *Hum. Mov. Sci.*, vol. 68, p. 102540, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.102540>.
- [142] R. Begg, R. Best, L. Dell’Oro, and S. Taylor, “Minimum foot clearance during walking: Strategies for the minimisation of trip-related falls,” *Gait Posture*, vol. 25, no. 2, pp. 191–198, 2007, doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.03.008.
- [143] N. Herssens, E. Verbecque, A. Hallemans, L. Vereeck, V. Van Rompaey, and W. Saeys, “Do spatiotemporal parameters and gait variability differ across the lifespan of healthy adults? A systematic review,” *Gait Posture*, vol. 64, pp. 181–190, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.06.012>.
- [144] B. E. Maki, “Gait Changes in Older Adults: Predictors of Falls or Indicators of Fear?,” *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 45, no. 3, pp. 313–320, Mar. 1997, doi: 10.1111/j.1532-5415.1997.tb00946.x.
- [145] S. Nakakubo, T. Doi, R. Sawa, S. Misu, K. Tsutsumimoto, and R. Ono, “Does arm swing emphasized deliberately increase the trunk stability during walking in the elderly adults?,” *Gait Posture*, vol. 40, no. 4, pp. 516–520, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.06.005>.
- [146] D. A. Winter, A. E. Patla, J. S. Frank, and S. E. Walt, “Biomechanical Walking Pattern Changes in the Fit and Healthy Elderly,” *Phys. Ther.*, vol. 70, no. 6, pp. 340–347, Jun. 1990, doi: 10.1093/ptj/70.6.340.
- [147] L.-S. Chou, K. R. Kaufman, M. E. Hahn, and R. H. Brey, “Medio-lateral motion of the center of

- mass during obstacle crossing distinguishes elderly individuals with imbalance," *Gait Posture*, vol. 18, no. 3, pp. 125–133, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(02\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(02)00067-X).
- [148] J. M. Hausdorff, D. A. Rios, and H. K. Edelberg, "Gait variability and fall risk in community-living older adults: A 1-year prospective study," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 82, no. 8, pp. 1050–1056, 2001, doi: <https://doi.org/10.1053/apmr.2001.24893>.
- [149] W. J. Rejeski and S. L. Mihalko, "Physical Activity and Quality of Life in Older Adults," *Journals Gerontol. Ser. A*, vol. 56, no. suppl_2, pp. 23–35, Oct. 2001, doi: [10.1093/gerona/56.suppl_2.23](https://doi.org/10.1093/gerona/56.suppl_2.23).
- [150] H.-C. Chen, J. A. Ashton-Miller, N. B. Alexander, and A. B. Schultz, "Stepping Over Obstacles: Gait Patterns of Healthy Young and Old Adults," *J. Gerontol.*, vol. 46, no. 6, pp. M196–M203, Nov. 1991, doi: [10.1093/geronj/46.6.M196](https://doi.org/10.1093/geronj/46.6.M196).
- [151] W. A. Sparrow, A. J. Shinkfield, S. Chow, and R. K. Begg, "Characteristics of gait in stepping over obstacles," *Hum. Mov. Sci.*, vol. 15, no. 4, pp. 605–622, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(96\)00022-X](https://doi.org/10.1016/0167-9457(96)00022-X).
- [152] H.-F. Pan, H.-C. Hsu, W.-N. Chang, J.-H. Renn, and H.-W. Wu, "Strategies for obstacle crossing in older adults with high and low risk of falling," *J. Phys. Ther. Sci.*, vol. 28, no. 5, pp. 1614–1620, May 2016, doi: [10.1589/jpts.28.1614](https://doi.org/10.1589/jpts.28.1614).
- [153] L.-S. Chou and L. F. Draganich, "Stepping over an obstacle increases the motions and moments of the joints of the trailing limb in young adults," *J. Biomech.*, vol. 30, no. 4, pp. 331–337, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(96\)00161-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(96)00161-3).
- [154] E. L. Stegemöller, T. A. Buckley, C. Pitsikoulis, E. Barthelemy, R. Roemmich, and C. J. Hass, "Postural Instability and Gait Impairment During Obstacle Crossing in Parkinson's Disease," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 93, no. 4, pp. 703–709, Apr. 2012, doi: [10.1016/j.apmr.2011.11.004](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.11.004).
- [155] A. E. Patla, E. Niechwiej, V. Racco, and M. A. Goodale, "Understanding the contribution of binocular vision to the control of adaptive locomotion," *Exp. Brain Res.*, vol. 142, no. 4, pp. 551–561, 2002, doi: [10.1007/s00221-001-0948-x](https://doi.org/10.1007/s00221-001-0948-x).
- [156] N. Mollaei, E. Bicho, N. Sousa, and M. F. Gago, "Different protocols for analyzing behavior and adaptability in obstacle crossing in Parkinson's disease," *Clin. Interv. Aging*, vol. 12, pp. 1843–1857, Nov. 2017, doi: [10.2147/CIA.S147428](https://doi.org/10.2147/CIA.S147428).
- [157] M. J. H. Heijnen, B. C. Muir, and S. Rietdyk, "Factors leading to obstacle contact during adaptive locomotion," *Exp. Brain Res.*, vol. 223, no. 2, pp. 219–231, 2012, doi: [10.1007/s00221-012-3253-y](https://doi.org/10.1007/s00221-012-3253-y).
- [158] N. B. Alexander *et al.*, "Maintenance of balance, gait patterns, and obstacle clearance in Alzheimer's disease," *Neurology*, vol. 45, no. 5, pp. 908 LP – 914, May 1995, doi: [10.1212/WNL.45.5.908](https://doi.org/10.1212/WNL.45.5.908).
- [159] L. F. Draganich, J. Zacny, J. Klawns, and T. Karrison, "The Effects of Antidepressants on Obstructed and Unobstructed Gait in Healthy Elderly People," *Journals Gerontol. Ser. A*, vol. 56, no. 1, pp. M36–M41, Jan. 2001, doi: [10.1093/gerona/56.1.M36](https://doi.org/10.1093/gerona/56.1.M36).
- [160] N. C. McKenzie and L. A. Brown, "Obstacle negotiation kinematics: age-dependent effects of postural threat," *Gait Posture*, vol. 19, no. 3, pp. 226–234, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(03\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(03)00060-2).
- [161] F. Pieruccini-Faria and M. Montero-Odasso, "Obstacle Negotiation, Gait Variability, and Risk of Falling: Results From the 'Gait and Brain Study,'" *Journals Gerontol. Ser. A*, vol. 74, no. 9, pp. 1422–1428, Aug. 2019, doi: [10.1093/gerona/gly254](https://doi.org/10.1093/gerona/gly254).
- [162] L.-S. Chou, K. R. Kaufman, R. H. Brey, and L. F. Draganich, "Motion of the whole body's center of mass when stepping over obstacles of different heights," *Gait Posture*, vol. 13, no. 1, pp. 17–26, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00087-4).
- [163] H.-C. Chen, J. A. Ashton-Miller, N. B. Alexander, and A. B. Schultz, "Age effects on strategies used to avoid obstacles," *Gait Posture*, vol. 2, no. 3, pp. 139–146, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0966-6362\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0966-6362(94)90001-9).
- [164] J. H. Chien, J. Post, and K.-C. Siu, "Effects of Aging on the Obstacle Negotiation Strategy while Stepping over Multiple Obstacles," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, p. 8576, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28888-4>.

- 10.1038/s41598-018-26807-5.
- [165] A. J. BLAKE *et al.*, “FALLS BY ELDERLY PEOPLE AT HOME: PREVALENCE AND ASSOCIATED FACTORS,” *Age Ageing*, vol. 17, no. 6, pp. 365–372, Nov. 1988, doi: 10.1093/ageing/17.6.365.
- [166] M. Pijnappels, P. J. C. E. van der Burg, N. D. Reeves, and J. H. van Dieën, “Identification of elderly fallers by muscle strength measures,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 102, no. 5, pp. 585–592, Mar. 2008, doi: 10.1007/s00421-007-0613-6.
- [167] C. R. Lowrey, A. Watson, and L. A. Vallis, “Age-related changes in avoidance strategies when negotiating single and multiple obstacles,” *Exp. Brain Res.*, vol. 182, no. 3, pp. 289–299, 2007, doi: 10.1007/s00221-007-0986-0.
- [168] B. C. Muir, J. M. Haddad, M. J. H. Heijnen, and S. Rietdyk, “Proactive gait strategies to mitigate risk of obstacle contact are more prevalent with advancing age,” *Gait Posture*, vol. 41, no. 1, pp. 233–239, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.10.005>.
- [169] B. J. McFadyen and F. Prince, “Avoidance and Accommodation of Surface Height Changes by Healthy, Community-Dwelling, Young, and Elderly Men,” *Journals Gerontol. Ser. A*, vol. 57, no. 4, pp. B166–B174, Apr. 2002, doi: 10.1093/gerona/57.4.B166.
- [170] S. T. Larson and J. Wilbur, “Muscle Weakness in Adults: Evaluation and Differential Diagnosis.,” *American family physician.*, vol. 101, no. 2. American Academy of Family Physicians, Leawood, KS :, pp. 95–108, 2020.
- [171] H. Li *et al.*, “The Relationship Between the Striatal Dopaminergic Neuronal and Cognitive Function With Aging ,” *Frontiers in Aging Neuroscience* , vol. 12. 2020.
- [172] M. W. Rogers and M.-L. Mille, “Lateral Stability and Falls in Older People,” *Exerc. Sport Sci. Rev.*, vol. 31, no. 4, 2003.
- [173] R. Vitória, F. Pieruccini-Faria, F. Stella, S. Gobbi, and L. T. B. Gobbi, “Effects of obstacle height on obstacle crossing in mild Parkinson’s disease,” *Gait Posture*, vol. 31, no. 1, pp. 143–146, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.GAITPOST.2009.09.011.
- [174] B. Galna, A. T. Murphy, and M. E. Morris, “Obstacle crossing in people with Parkinson’s disease: foot clearance and spatiotemporal deficits,” *Hum. Mov. Sci.*, vol. 29, no. 5, pp. 843–852, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.humov.2009.09.006.
- [175] R. Vitória *et al.*, “Disease severity affects obstacle crossing in people with Parkinson’s disease,” *Gait Posture*, vol. 40, no. 1, pp. 266–269, May 2014, doi: 10.1016/J.GAITPOST.2014.03.003.
- [176] S. Bovonsunthonchai, R. Vachalathiti, A. Pisarnpong, F. Khobhun, and V. Hiengkaew, “Spatiotemporal Gait Parameters for Patients with Parkinson’s Disease Compared with Normal Individuals,” *Physiother. Res. Int.*, vol. 19, no. 3, pp. 158–165, Sep. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/pri.1579>.
- [177] L. Simieli *et al.*, “Variability of crossing phase in older people with Parkinson’s disease is dependent of obstacle height,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, p. 14852, Oct. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-33312-2.
- [178] T. S. Voss *et al.*, “Fall frequency and risk assessment in early Parkinson’s disease,” *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 18, no. 7, pp. 837–841, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.parkreldis.2012.04.004.
- [179] A. L. Adkin, B. R. Bloem, and J. H. J. Allum, “Trunk sway measurements during stance and gait tasks in Parkinson’s disease,” *Gait Posture*, vol. 22, no. 3, pp. 240–249, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.gaitpost.2004.09.009.
- [180] A. Nardone and M. Schieppati, “Balance in Parkinson’s disease under static and dynamic conditions,” *Mov. Disord.*, vol. 21, no. 9, pp. 1515–1520, Sep. 2006, doi: 10.1002/mds.21015.
- [181] E. Warmerdam *et al.*, “Proposed Mobility Assessments with Simultaneous Full-Body Inertial Measurement Units and Optical Motion Capture in Healthy Adults and Neurological Patients for Future Validation Studies: Study Protocol,” *Sensors (Basel).*, vol. 21, no. 17, p. 5833, Aug. 2021, doi: 10.3390/s21175833.
- [182] J. Woo, J. Leung, and J. E. Morley, “Validating the SARC-F: A Suitable Community Screening Tool for Sarcopenia?,” *J. Am. Med. Dir. Assoc.*, vol. 15, no. 9, pp. 630–634, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2014.04.021>.

- [183] C. G. Goetz *et al.*, "Movement Disorder Society-sponsored revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale presentation and clinimetric testing results," *Mov. Disord.*, vol. 23, no. 15, pp. 2129–2170, Nov. 2008, doi: 10.1002/mds.22340.
- [184] P. Martinez-Martin *et al.*, "Validation study of the hoehn and yahr scale included in the MDS-UPDRS," *Mov. Disord.*, vol. 33, no. 4, pp. 651–652, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/mds.27242>.
- [185] C. G. Goetz *et al.*, "Movement Disorder Society Task Force report on the Hoehn and Yahr staging scale: Status and recommendations The Movement Disorder Society Task Force on rating scales for Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 19, no. 9, pp. 1020–1028, Sep. 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/mds.20213>.
- [186] Z. S. Nasreddine *et al.*, "The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A Brief Screening Tool For Mild Cognitive Impairment," *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 53, no. 4, pp. 695–699, Apr. 2005, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x>.
- [187] M. Kasten, N. Bruggemann, A. Schmidt, and C. Klein, "VALIDITY OF THE MoCA AND MMSE IN THE DETECTION OF MCI AND DEMENTIA IN PARKINSON DISEASE," *Neurology*, vol. 75, no. 5, pp. 478 LP – 479, Aug. 2010, doi: 10.1212/WNL.0b013e3181e7948a.
- [188] D. Orcioli-Silva *et al.*, "Walking behavior over multiple obstacles in people with Parkinson's disease," *Gait Posture*, vol. 58, pp. 510–515, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.09.021>.
- [189] "Effects of obstacle height on obstacle crossing in mild Parkinson's disease - ScienceDirect." [Online]. Available: <https://vpn.uni-kiel.de/proxy/11fc1f99/https/www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966636209006250?via%3Dihub>. [Accessed: 12-Mar-2020].
- [190] B. Galna, A. T. Murphy, and M. E. Morris, "Obstacle crossing in Parkinson's disease: mediolateral sway of the centre of mass during level-ground walking and obstacle crossing," *Gait Posture*, vol. 38, no. 4, pp. 790–794, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.gaitpost.2013.03.024.
- [191] C. P. Bertram, M. Lemay, and G. E. Stelmach, "The effect of Parkinson's disease on the control of multi-segmental coordination," *Brain Cogn.*, vol. 57, no. 1, pp. 16–20, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.08.014>.
- [192] V. Weerdesteyn, B. Nienhuis, and J. Duysens, "Advancing age progressively affects obstacle avoidance skills in the elderly," *Hum. Mov. Sci.*, vol. 24, no. 5, pp. 865–880, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2005.10.013>.
- [193] E. L. Lamoureux, W. A. Sparrow, A. Murphy, and R. U. Newton, "The Relationship Between Lower Body Strength and Obstructed Gait in Community-Dwelling Older Adults," *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 50, no. 3, pp. 468–473, Mar. 2002, doi: <https://doi.org/10.1046/j.1532-5415.2002.50112.x>.
- [194] R. Gueorguieva and J. H. Krystal, "Move Over ANOVA: Progress in Analyzing Repeated-Measures Data and Its Reflection in Papers Published in the Archives of General Psychiatry," *Arch. Gen. Psychiatry*, vol. 61, no. 3, pp. 310–317, Mar. 2004, doi: 10.1001/archpsyc.61.3.310.
- [195] K. Anders, "Resolution of Students t-tests, ANOVA and analysis of variance components from intermediary data," *Biochem. medica*, vol. 27, no. 2, pp. 253–258, Jun. 2017, doi: 10.11613/BM.2017.026.
- [196] M. J. Blanca Mena, R. Alarcón Postigo, J. Arnau Gras, R. Bono Cabré, and R. Bendayan, "Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?," <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>, 2017.
- [197] A. Hazra and N. Gogtay, "Biostatistics Series Module 6: Correlation and Linear Regression," *Indian J. Dermatol.*, vol. 61, no. 6, pp. 593–601, 2016, doi: 10.4103/0019-5154.193662.
- [198] J. H. Hollman, F. M. Kovash, J. J. Kubik, and R. A. Linbo, "Age-related differences in spatiotemporal markers of gait stability during dual task walking," *Gait Posture*, vol. 26, no. 1, pp. 113–119, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.08.005>.
- [199] K. Cheryl and B. H. K., "Evidence-Based Practice Guideline: Fall Prevention for Older Adults," *J. Gerontol. Nurs.*, vol. 43, no. 11, pp. 15–21, Nov. 2017, doi: 10.3928/00989134-20171016-01.
- [200] J. Pynoos, B. A. Steinman, and A. Q. D. Nguyen, "Environmental assessment and modification as fall-prevention strategies for older adults," *Clin. Geriatr. Med.*, vol. 26, no. 4, pp. 633–644,

- Nov. 2010, doi: 10.1016/j.cger.2010.07.001.
- [201] D. Orcioli-Silva *et al.*, “Double obstacles increase gait asymmetry during obstacle crossing in people with Parkinson’s disease and healthy older adults: A pilot study,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 2272, Feb. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-59266-y.
- [202] T. C. Rubinstein, N. Giladi, and J. M. Hausdorff, “The power of cueing to circumvent dopamine deficits: A review of physical therapy treatment of gait disturbances in Parkinson’s disease,” *Mov. Disord.*, vol. 17, no. 6, pp. 1148–1160, Nov. 2002, doi: <https://doi.org/10.1002/mds.10259>.
- [203] R. Vitória, E. Lirani-Silva, F. A. Barbieri, V. Raile, F. Stella, and L. T. B. Gobbi, “Influence of visual feedback sampling on obstacle crossing behavior in people with Parkinson’s disease,” *Gait Posture*, vol. 38, no. 2, pp. 330–334, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.12.019>.
- [204] F. Pieruccini-Faria, M. Menuchi, R. Vitória, L. T. B. Gobbi, F. Stella, and S. Gobbi, “Parâmetros cinemáticos da marcha com obstáculos em idosos com Doença de Parkinson, com e sem efeito da levodopa: um estudo piloto,” *Brazilian Journal of Physical Therapy*, vol. 10, scielo, pp. 233–239, 2006.
- [205] S. A. Eshkoor, T. A. Hamid, C. Y. Mun, and C. K. Ng, “Mild cognitive impairment and its management in older people,” *Clin. Interv. Aging*, vol. 10, pp. 687–693, Apr. 2015, doi: 10.2147/CIA.S73922.
- [206] P. W. Overstall, A. N. Exton-Smith, F. J. Imms, and A. L. Johnson, “Falls in the elderly related to postural imbalance,” *Br. Med. J.*, vol. 1, no. 6056, pp. 261–264, Jan. 1977, doi: 10.1136/bmj.1.6056.261.
- [207] D. Kendrick *et al.*, “Exercise for reducing fear of falling in older people living in the community,” *Cochrane database Syst. Rev.*, vol. 2014, no. 11, pp. CD009848–CD009848, Nov. 2014, doi: 10.1002/14651858.CD009848.pub2.
- [208] J. V. Jacobs and F. B. Horak, “Abnormal proprioceptive-motor integration contributes to hypometric postural responses of subjects with parkinson’s disease,” *Neuroscience*, vol. 141, no. 2, pp. 999–1009, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2006.04.014>.
- [209] L.-S. Chou and L. F. Draganich, “Increasing obstacle height and decreasing toe-obstacle distance affect the joint moments of the stance limb differently when stepping over an obstacle,” *Gait Posture*, vol. 8, no. 3, pp. 186–204, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(98\)00034-4](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(98)00034-4).
- [210] M. F. Reelick, M. B. van Iersel, R. P. C. Kessels, and M. G. M. O. Rikkert, “The influence of fear of falling on gait and balance in older people,” *Age Ageing*, vol. 38, no. 4, pp. 435–440, Jul. 2009, doi: 10.1093/ageing/afp066.
- [211] L.-S. Chou and L. F. Draganich, “Placing the trailing foot closer to an obstacle reduces flexion of the hip, knee, and ankle to increase the risk of tripping,” *J. Biomech.*, vol. 31, no. 8, pp. 685–691, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(98\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00081-5).
- [212] M. A. Thenganatt and J. Jankovic, “Parkinson Disease Subtypes,” *JAMA Neurol.*, vol. 71, no. 4, pp. 499–504, Apr. 2014, doi: 10.1001/jamaneurol.2013.6233.
- [213] L. M. L. de Lau, D. Verbaan, J. Marinus, and J. J. van Hilten, “Survival in Parkinson’s disease. Relation with motor and non-motor features,” *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 20, no. 6, pp. 613–616, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2014.02.030>.
- [214] S. L. Mitchell, J. J. Collin, C. J. De Luca, A. Burrows, and L. A. Lipsitz, “Open-loop and closed-loop postural control mechanisms in Parkinson’s disease: increased mediolateral activity during quiet standing,” *Neurosci. Lett.*, vol. 197, no. 2, pp. 133–136, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0304-3940\(95\)11924-L](https://doi.org/10.1016/0304-3940(95)11924-L).
- [215] F. Doná *et al.*, “Changes in postural control in patients with Parkinson’s disease: a posturographic study,” *Physiotherapy*, vol. 102, no. 3, pp. 272–279, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physio.2015.08.009>.
- [216] S. Stuart, S. Lord, E. Hill, and L. Rochester, “Gait in Parkinson’s disease: A visuo-cognitive challenge,” *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 62, pp. 76–88, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.01.002>.

- [217] F. Huxham, R. Baker, M. E. Morris, and R. Iansek, "Head and trunk rotation during walking turns in Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 23, no. 10, pp. 1391–1397, Jul. 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/mds.21943>.
- [218] J. W. Błaszczyk and R. Orawiec, "Assessment of postural control in patients with Parkinson's disease: Sway ratio analysis," *Hum. Mov. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 396–404, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.07.017>.
- [219] C. R. Kovacs, "Age-Related Changes in Gait and Obstacle Avoidance Capabilities in Older Adults: A Review," *J. Appl. Gerontol.*, vol. 24, no. 1, pp. 21–34, Feb. 2005, doi: [10.1177/0733464804271279](https://doi.org/10.1177/0733464804271279).
- [220] E. Kühn *et al.*, "Correlates of polyneuropathy in Parkinson's disease," *Ann. Clin. Transl. Neurol.*, vol. 7, no. 10, pp. 1898–1907, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/acn3.51182>.
- [221] M. F. Corrà, E. Warmerdam, N. Vila-Chã, W. Maetzler, and L. Maia, "Wearable Health Technology to Quantify the Functional Impact of Peripheral Neuropathy on Mobility in Parkinson's Disease: A Systematic Review," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 22, p. 6627, Nov. 2020, doi: [10.3390/s20226627](https://doi.org/10.3390/s20226627).
- [222] H. J. A. van Hedel, D. Waldvogel, and V. Dietz, "Learning a high-precision locomotor task in patients with Parkinson's disease," *Mov. Disord.*, vol. 21, no. 3, pp. 406–411, Mar. 2006, doi: <https://doi.org/10.1002/mds.20710>.
- [223] T.-W. Lu, H.-L. Chen, and S.-C. Chen, "Comparisons of the lower limb kinematics between young and older adults when crossing obstacles of different heights," *Gait Posture*, vol. 23, no. 4, pp. 471–479, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.06.005>.
- [224] L. Alcock, B. Galna, J. M. Hausdorff, S. Lord, and L. Rochester, "Gait & Posture Special Issue: Gait adaptations in response to obstacle type in fallers with Parkinson's disease," *Gait Posture*, vol. 61, pp. 368–374, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.01.030>.
- [225] A. E. J. Miller, J. D. MacDougall, M. A. Tarnopolsky, and D. G. Sale, "Gender differences in strength and muscle fiber characteristics," *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, vol. 66, no. 3, pp. 254–262, 1993, doi: [10.1007/BF00235103](https://doi.org/10.1007/BF00235103).
- [226] A. Lavedán *et al.*, "Correction: Fear of falling in community-dwelling older adults: A cause of falls, a consequence, or both?," *PLoS One*, vol. 13, no. 5, p. e0197792, May 2018, doi: [10.1371/journal.pone.0197792](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197792).
- [227] A. Schrag, Y. Ben-Shlomo, and N. P. Quinn, "Cross sectional prevalence survey of idiopathic Parkinson's disease and Parkinsonism in London," *BMJ*, vol. 321, no. 7252, pp. 21–22, Jul. 2000, doi: [10.1136/bmj.321.7252.21](https://doi.org/10.1136/bmj.321.7252.21).
- [228] C. Sherrington *et al.*, "Exercise to prevent falls in older adults: an updated systematic review and meta-analysis," *Br. J. Sports Med.*, vol. 51, no. 24, pp. 1750 LP – 1758, Dec. 2017, doi: [10.1136/bjsports-2016-096547](https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096547).

Anhang

Tabelle 15: Layout des Strength, assistance with walking, rising from a chair, climbing stairs, and falls (SARC-F) Questionnaire zur Erfassung einer Sarkopenie

Component	Question	Scoring
Strength	How much difficulty do you have in lifting and carrying 4.5kg (10 pounds)?	None = 0 Some = 1 A lot or unable=2
Assistance in walking	How much difficulty do you have walking across a room?	None = 0 Some = 1 A lot,use aids, or unable = 2
Rise from a chair	How much difficulty do you have transferring from a chair/bed?	None = 0 Some = 1 A lot or unable without help = 2
Climb stairs	How much difficulty do you have climbing a flight of 10 stairs?	None = 0 Some = 1 A lot or unable = 2
Falls	How many times have you fallen in the last year?	None = 0 1-3 falls = 1 4 or more falls = 2

Tabelle 16: Layout des MDS UPDRS Part 3 (Motor function)

1.	Speech	
2.	Facial expression	
3a.	Rigidity - Neck	
3b.	Rigidity - RUE	
3c.	Rigidity - LUE	
3d.	Rigidity - RLE	
3d.	Rigidity - LLE	
4a.	Finger tapping - Right hand	
4b.	Finger tapping - Left hand	
5a.	Hand movements - Right hand	
5b.	Hand movements - Left hand	
6a.	Pronation-Supination movements - Right hand	
6b.	Pronation-Supination movements - Left hand	
7a.	Toe tapping - Right foot	
7b.	Toe tapping - Left foot	
8a.	Leg agility - Right leg	
8b.	Leg agility - Left leg	
9.	Arising from chair	
10.	Gait	
11.	Freezing of gait	
12.	Postural stability	
13.	Posture	
14.	Global spontaneity of movement	
15a.	Postural tremor - Right hand	
15b.	Postural tremor - Left hand	
16a.	Kinetic tremor - Right hand	
16b.	Kinetic tremor - Left hand	
17a.	Rest tremor - RUE	
17b.	Rest tremor - LUE	
17c.	Rest tremor - RLE	
17d.	Rest tremor - LLE	
17e.	Rest tremor - Lip/Jaw	
18	Constancy of rest	
	Were dyskinesias present?	<input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes
	Did these movements interfere with ratings?	<input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes
	Hoehn and Yahr Stadium	

MONTREAL COGNITIVE ASSESSMENT (MOCA)

NAME :
 Ausbildung :
 Geschlecht :
 Geburtsdatum :
 DATUM :

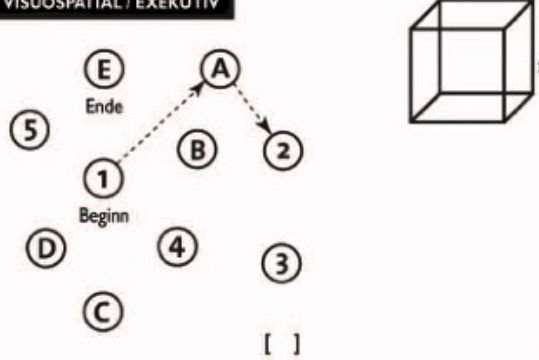

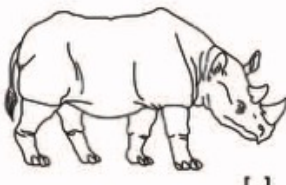

VISUOSPATIAL / EXEKUTIV							PUNKTE	
 <p>Würfel nachzeichnen</p>	Eine Uhr zeichnen (Zehn nach elf) (3 Punkte)					[] /5		
BENENNEN								
							[] [] [] ___/3	
GEDÄCHTNIS								
Wortliste vorlesen, wiederholen lassen. 2 Durchgänge. Nach 5 Minuten überprüfen (s.u.)			GESICHT	SAMT	KIRCHE	TULPE	ROT	Keine Punkte
			1.Versuch	[]	[]	[]	[]	
			2.Versuch	[]	[]	[]	[]	
AUFMERKSAMKEIT								
Zahlenliste vorlesen (1 Zahl/ Sek.)			In der vorgegebenen Reihenfolge wiederholen [] 2 1 8 5 4 Rückwärts wiederholen [] 7 4 2				___/2	
Buchstabenliste vorlesen (1 Buchst./Sek.), Patient soll bei jedem Buchstaben „A“ mit der Hand klopfen. Keine Punkte bei 2 oder mehr Fehlern [] FBACMNAAJKLBFAFAKDEAAAJAMOFFAAB							___/1	
Fortlaufendes Abziehen von 7, mit 100 anfangen [] 93 [] 86 [] 79 [] 72 [] 65 4 oder 5 korrekte Ergebnisse: 3 P., 2 oder 3 korrekt: 2 P., 1 korrekt: 1 P., 0 korrekt: 0 P.							___/3	
SPRACHE								
Wiederholen: „Ich weiß lediglich, daß Horst heute an der Reihe ist zu helfen.“ [] „Die Katze versteckte sich immer unter der Couch, wenn die Hunde im Zimmer waren.“ []							___/2	
Möglichst viele Wörter in einer Minute benennen, die mit dem Buchstaben F beginnen [] _____ (N ≥ 11 Wörter)							___/1	
ABSTRAKTION								
Gemeinsamkeit von z.B. Banane und Apfelsine = Frucht [] Eisenbahn - Fahrrad [] Uhr - Lineal							___/2	
ERINNERUNG								
Wörter erinnern OHNE HINWEIS			GESICHT	SAMT	KIRCHE	TULPE	ROT	Punkte nur bei richtigem Nennen OHNE Hinweis
			[]	[]	[]	[]	[]	
Optional Hinweis zu Kategorie Mehrfachauswahl								
ORIENTIERUNG								
[] Datum [] Monat [] Jahr [] Wochentag [] Ort [] Stadt							___/6	
© Z Nasreddine MD Version: 7. Nov. 2004, deutsche Übersetzung: SH Bartsch, SG Zipper								
www.mocatest.org Untersucher: _____								
Normal ≥ 26 / 30								
TOTAL							___/30 + 1 Punkt wenn ≤ 12 Jahre Ausbildung	

Abbildung 12: Layout des Montreal Cognitive Assessment Tests zur Erfassung des kognitiven Status.

Erklärung zum Eigenanteil

Der Promovend beteiligte sich vor der Anfertigung dieser Dissertation an der damals neu aufgebauten KeepControl Studie (Projekt-No. D438/18), welche sich mit Mobilitätsmessungen von gesunden jungen Probanden, gesunden älteren Probanden und Menschen mit Bewegungsstörungen (IPS, Multiple Sklerose, Schlaganfall) beschäftigte. Der Promovend half an der Organisation des Aufbaus der Studie, nahm an wöchentlichen Besprechungen teil und realisierte die ersten Testläufe. Mit einem Umfang von circa 450 Stunden führte er Bewegungsmessungen und neuropsychologische Testungen durch. Außerdem eignete er sich Kenntnisse über verschiedene Sensorsysteme und Fragebögen, wie dem SARC-F Questionnaire, zur Ermittlung der Mobilität und des Auftretens von Stürzen der Probanden. Gleichzeitig führte er mithilfe des Qualisys Track Managers die postanalytische Zuordnung der reflektierenden Bewegungsmarker zu den entsprechenden Körperteilen durch. Mit dem Wissen folgte die selbstständige Entwicklung der Arbeitshypothese aus den Daten der KeepControl Studie. Die Hindernisüberwindungen wurden selbstständig statistisch ausgewertet und unter Aufsicht von Elke Warmerdam und Prof. Dr. Walter Maetzler interpretiert. Eine selbstständige Literaturrecherche und Implementierung und dieser folgte für die Anfertigung der Dissertation.

Der Promovend versichert hiermit, das gesamte Manuskript selbstständig erfasst zu haben und keine weiteren Quellen als die angegebenen verwendet zu haben.

Unterzeichnet von

Falko Peters (Promovend)

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'F. Peters', written over a horizontal line.

Danksagung

Ohne die Hilfe einer Vielzahl von Personen wäre die Fertigstellung meiner Arbeit niemals möglich gewesen. Daher möchte an dieser Stelle denjenigen Menschen danken, die mich über die gesamte, sehr intensive und lohnende Phase meiner akademischen Laufbahn begleitet und unterstützt haben.

Als aller erstes gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater Prof. Dr. Walter Maetzler für die herzliche und zuverlässige Betreuung. Er hat mich zu jederzeit bedingungslos unterstützt und meine Arbeit durch seine kreativen, fachlich hoch anspruchsvollen Anregungen immer wieder in neue Bahnen gelenkt. Für die intensiven Erfahrungen auf wissenschaftlicher und auch menschlicher Ebene möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Für die hoch engagierte und vertrauensvolle Unterstützung gebührt mein Dank zudem meiner Betreuerin Elke Warmerdam. Sie stand mir jederzeit für konstruktive, bereichernde Gespräche zur Verfügung. Ohne ihre zeitintensiven Korrekturlesungen, ihren akademischen Rat und den stetigen Austausch wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Meinen wissenschaftlichen Kollegen der neurogeriatrischen Arbeitsgruppe danke ich für die herzliche Aufnahme und die zahlreichen fachlichen und kreativen Anregungen. Der Rückhalt hat mir das notwendige Durchhaltevermögen zur Fertigstellung meiner Arbeit gegeben. Ich bin stolz, ein Teil der Gruppe gewesen zu sein.

Ein weiterer Dank gilt zudem allen Teilnehmern und Teilnehmerinnen der KeepControl Studie. Ohne ihre Informationsbereitschaft und die motivierte Mitarbeit wäre das gesamte Projekt nicht zustande gekommen. Dass sie sich die Zeit genommen haben und ich Einblicke in die Schwierigkeiten im Leben eines Parkinsonpatienten gewinnen durfte, weiß ich sehr zu schätzen.

Eine herausragende Stellung in jeglicher Hinsicht nimmt meine Familie ein, die mir nicht nur mein Studium ermöglicht, sondern mich in jeder Lebenslage unterstützt hat. Für ihre fürsorgliche und emotionale Unterstützung, die mir stets die notwendige Kraft zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben hat, bin ich ihnen unendlich dankbar.

Veröffentlichungen

Warmerdam E, Romijnders R, Geritz J, Elshehabi M, Maetzler C, Otto JC, Reimer M, Stuermer K, Baron R, Paschen S, Beyer T, Dopcke D, Eiken T, Ortmann H, Peters F, Recke FV, Riesen M, Rohwedder G, Schaade A, Schumacher M, Sondermann A, Maetzler W, Hansen C. Proposed Mobility Assessments with Simultaneous Full-Body Inertial Measurement Units and Optical Motion Capture in Healthy Adults and Neurological Patients for Future Validation Studies: Study Protocol. *Sensors* (Basel). 2021 Aug 30;21(17):5833. doi: 10.3390/s21175833. PMID: 34502726; PMCID: PMC8434336.

Präsentation der Arbeit auf dem Deutschen Kongress für Parkinson und Bewegungsstörungen am 24. bis 26. März 2022 in Hannover

Gangparameter und Oberkörperstabilität von Parkinsonpatienten und älteren Menschen beim Überqueren von Hindernissen

Kiel University
 Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
 Faculty of Medicine

Falko Peters¹, Elke Warmerdam¹, Clint Hansen¹, Walter Maetzler¹
¹Klinik für Neurologie, UKSH, Campus Kiel

Einleitung

Menschen im höheren Lebensalter und Patienten mit einem idiopathischen Parkinsonsyndrom (IPS) sind einem erhöhten Sturzrisiko ausgesetzt. Wiederholte Stürze ereignen sich häufig beim Gehen über banale Hindernisse im Alltag und haben eine Reduktion der Lebensqualität sowie eine Zunahme von Morbidität und Mortalität zur Folge. Diese Studie hat ein besseres Verständnis für den Einfluss von Alter und IPS auf das Verhalten beim Gehen über Hindernisse und das Erkennen potentieller Risikofaktoren zum Ziel.

Methoden

1. Durchgang: 10 cm hohes Hindernis
2. Durchgang: 20 cm hohes Hindernis

Gangparameter

Fuß: Fuß des Folgebeins; FFuß: Fuß des Führungsbeins; SB: Schrittweite

Oberkörperstabilität

Messung von Auslenkungen des Körpers mithilfe von Winkeln zwischen Körpersegmenten:

1. Winkel zwischen Füßen und Hüfte
2. Winkel zwischen Füßen und Brustkorb
3. Winkel zwischen Hüfte und Brustkorb

Zusammenhang zwischen positiver Sturzanamnese und gemessenen Parametern

SARC-F-Score: 0 Punkte: kein Sturz; 1 Punkt: 1-3 Stürze; 2 Punkte: ≥ 4 Stürze

Probanden

14 gesunde, junge Erwachsene (JE)
10 gesunde, alte Erwachsene (AE)
9 Parkinsonpatienten (IPS)

Optische 3D-Bewegungsanalyse

Position reflektierender Marker auf Knochenvorsprüngen

Ergebnisse

> Überwinden des 10 cm hohen Hindernisses

Räumlich-zeitliche Parameter:
Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kohorten

Kohorte	Höhe (m)
JE	~0.15
AE	~0.18
IPS	~0.18

AE und IPS tendierten mit dem Folgebein zu einer größeren Hindernisfreiheit

Oberkörperstabilität:
Unterschiede für den Winkel zwischen Hüfte und Brustkorb (p = 0.024)

Kohorte	Winkel (Grad)
JE	~15
AE	~10
IPS	~10

AE zeigten verglichen mit den anderen Kohorten einen geringeren Winkel

> Überwinden des 20 cm hohen Hindernisses

Räumlich-zeitliche Parameter:
keine signifikanten Unterschiede

Kohorte	Höhe (m)
JE	~0.15
AE	~0.18
IPS	~0.18

AE und IPS tendierten mit dem Folgebein zu einer größeren Hindernisfreiheit

Oberkörperstabilität:
keine signifikanten Unterschiede

Kohorte	Winkel (Grad)
JE	~15
AE	~10
IPS	~10

Für den Winkel zwischen Folgebein und Hüfte tendierten IPS-Patienten zu größeren Werten

> Zusammenhang zwischen Gangparameter und Sturzanamnese

Positive Korrelation zwischen Sturzrate und Hindernisfreiheit beim Gehen über das 10 cm hohe Hindernis für IPS-Patienten (p = 0.020).

Fazit

Eine große Hindernisfreiheit stellt einen potentiellen Risikofaktor für Stürze von IPS-Patienten dar.

Kontakt: Falko Peters
✉ Falko.Peters@outlook.com

Abbildung 13: Layout des Posters zur Präsentation auf dem Deutschen Kongress für Parkinson und Bewegungsstörungen.