

## Acknowledgements

This dissertation was conducted at the Center of Lifespan Development of the Max Planck Institute for Human Development directed at the beginning of this dissertation project by Prof. Paul B. Baltes and later by Prof. Ulman Lindenberger. This work was done in the context of the Intra-Person Dynamics Project (Principal Investigators: Shu-Chen Li, Ulman Lindenberger, Jaqui Smith and Paul Baltes). During the course of my dissertation, I was a member of the International Max Planck Research School „The Life Course: Evolutionary and Ontogenetic Dynamics (LIFE)”. I am grateful to the Max Planck Research School „LIFE” and the Max Planck Society for financing my dissertation through a pre-doctoral stipend.

Foremost, I want to express my special gratitude to my supervisors Prof. Paul B. Baltes, Prof. Shu-Chen Li, and Prof. Ulman Lindenberger. Paul B. Baltes not only gave me the opportunity to work in such a stimulating research context and laid out the theoretical and methodological foundations of my research; he was also a constructive critic in the best sense. My hope is that I took his suggestions seriously. Shu-Chen Li broadened my perspective of developmental processes by letting me participate from her impressive theoretical, methodological, and empirical knowledge on numerous aspects of cognitive and sensorimotor research. I am further grateful for her tremendous support in all other aspects that are involved in writing a thesis. I thank Prof. Lindenberger for „adopting” me into his newly formed research unit, his mental and instrumental support of this thesis, and his openness to ideas, which I cannot value highly enough.

I am grateful for the experience of being a part of the LIFE research school. I want to thank in general all fellows, members of the faculty, and the steering committee for creating such a friendly and stimulating context that widened my scientific understanding of the life sciences in many aspects. In particular, I want to thank Prof. Ralf Krampe, Prof. Patricia Reuter-Lorenz, and Prof. Rachael Seidler for the helpful discussions of my dissertation and for their insightful and encouraging comments on my research proposal.

My dissertation was written in the stimulating and professional atmosphere of the Intra-Person Dynamics Project. This project included about as many as thirty persons that were involved in the many aspects of the project. They all contributed to the extraordinary work environment in one way or the other. I want to thank the principal investigators of the study Shu-Chen Li, Ulman Lindenberger, Jaqui Smith, and Paul B. Baltes for setting up the foundations of the project, Kirsten Becker for her high competence in organizational issues and her insistence, and all student assistants and research assistants for their devotion to the study goals. Furthermore, I feel very grateful to all participants for making such a study possible by spending so much time and effort.

Furthermore, I want to express my gratitude to all the other members of the LIP-family, to the senior scientists, to my fellow graduate students, to all the student assistants, and to the general support staff. There is no telling how much my dissertation profited from working in such a network that is at the same time friendly and professional. In particular, I want to thank Florian Schmiedek for letting me speak without precise formulation and Christina Röcke for sharing all the ups and downs.

I want to thank Sina for her affectionate support in all these things that seem to be not directly related to the writing of a dissertation but that are due to limited shared resources so strongly coupled with the success of the dissertation. Finally, I thank Marla for her laughter.

**Abstract**

In recent years, research on aging has displayed a growing interest in the examination of intraindividual variability in various domains of psychological functioning. In this context, intraindividual processing fluctuations, defined as maladaptive performance fluctuations on short time scales, have been established as meaningful source of age- and health-related interindividual differences. In the domain of postural control, processing fluctuations have yet been exclusively investigated on the basis of moment-to-moment fluctuations. This dissertation takes a lifespan perspective and seeks to describe and explain adult age differences in processing fluctuations in postural control also on longer time scales. It is proposed that due to senescent changes older adults experience a loss of robustness in their postural control system, which results in processing fluctuations on multiple time scales. Furthermore, it is suggested that older adults compensate the systemic losses in their postural control capacity by investing more attention into the regulation of their posture. In this context, the interrelation of processing fluctuations between postural control and spatial working memory is investigated. To assure an appropriate fit between the theoretically assumed developmental mechanisms and the empirical data a person-centered approach is employed in the analysis of the cross-domain interrelation.

The empirical data that is used for the analysis is part of the Intra-Person Dynamics Project. It includes 18 young adults and 18 older adults. Their postural control performance and working memory performance was measured repeatedly on approximately 45 weekdays. Older adults showed higher processing fluctuations in postural control performance from moment-to-moment, from trial-to-trial, and from day-to-day. These findings are interpreted in terms of a general loss in system robustness due to senescent changes in a great variety of subsystems involved in postural regulation that lead to processing fluctuations across multiple time scales. Moreover, day-to-day processing fluctuations in postural control and spatial working memory were correlated within-persons. The strength and the direction of these intraindividual cross-domain couplings was related to interindividual differences in the overall status of the postural control system but not related to interindividual differences in the overall level of working memory performance. The latter findings are explained in terms of a dual-process model of cognitive permeation.

## Zusammenfassung

Diese Dissertation behandelt Altersunterschiede im Ausmaß intraindividuelle Leistungsschwankungen in der Gleichgewichtskontrolle im Erwachsenenalter. Nesselroade (1991) unterscheidet konzeptuell zwischen andauernden intraindividuellen Veränderungen und reversibler intraindividuelle Variabilität. In dieser Definition spricht man von intraindividuellen Veränderungen, wenn es sich um langfristige Veränderungen im Verhalten und Erleben handelt, die sich zum Teil aus kumulativen und interagierenden Entwicklungsprozessen ergeben. Klassische Beispiele für diese Form von Entwicklungsprozessen sind Reifungs- bzw. Seneszenzprozesse oder auch die Entwicklung von Expertenwissen. Es ist eine anhaltende Forderung der Lebensspannenpsychologie, diese Prozesse hinsichtlich ihrer Voraussetzungen, Konsequenzen und zeitlichen Korrelaten zu beschreiben und zu erklären (Baltes, 1987). Im Gegensatz zu den langfristigen entwicklungsabhängigen Veränderungen ist intraindividuelle Variabilität gekennzeichnet durch ein hohes Maß an Reversibilität. Intraindividuelle Variabilität ereignet sich innerhalb relativ kurzer Zeitskalen, z.B. von einem Moment zum nächsten oder von einem Tag zum anderen. Intraindividuelle Veränderungen hingegen lassen sich eher über mehrere Monate oder Jahre beobachten. Nesselroade (1991) konstatiert, dass intraindividuelle Variabilität auch innerhalb solcher psychologischer Funktionsbereiche zu beobachten ist, welche klassischerweise als stabil angesehen werden, die also in der psychologischen Theorie als „traits“ angesehen werden, wie zum Beispiel Persönlichkeitsmerkmale. Um eine umfassende Beschreibung einer Person hinsichtlich eines Merkmals zu erhalten, benötigt man in der Konsequenz eine mehrfache Messung dieses Merkmals. Mit Hilfe der Verteilung der potenziellen Werte eines Merkmals, die eine Person zu einem Zeitpunkt aufweisen kann, sollte es möglich sein, ein Verständnis für den gesamten Merkmalsraum zu erreichen, der kennzeichnend ist für die Person zu diesem Zeitpunkt (Nesselroade, 1991; Nesselroade & Ram, 2004). In diesem Kontext kann das Ausmaß intraindividuelle Variabilität ein personenspezifisches und zeitspezifisches Charakteristikum sein, das über Gruppen sowohl zu einem als auch zu mehreren Zeitpunkten verglichen werden kann.

Die Bedeutung intraindividuelle Variabilität als Quelle interindividuelle Unterschiede und als Gegenstand entwicklungspsychologischer Empirie hat innerhalb der letzten Jahre zugenommen. Dabei lassen sich innerhalb des Phänomens intraindividuelle Variabilität verschiedene Subtypen intraindividuelle Dynamiken unterscheiden (Li, Huxhold, & Schmiedek, 2004; Lindenberger & Oertzen, 2006). In der kognitiven Altersforschung werden in zunehmendem Maße Prozessfluktuationen untersucht, die definiert sind als dysfunktionale, maladaptive Fluktuationen in der kognitiven Leistung innerhalb von kurzen Zeiträumen (siehe

Hultsch & MacDonald, 2004). In dieser Dissertation wird die Definition von Prozessfluktuationen erweitert. Prozessfluktuationen sind Bestandteil eines jeden Funktionssystems, das multiple Subsysteme, multiple Kontrollmechanismen und Interaktionen zwischen dem Organismus und der Umwelt umfasst. Häufig kann es gerade die Aufgabe multipler Kontrollmechanismen sein, Prozessfluktuationen im Systemoutput zu minimieren. Diese Art von Minimierung findet sich beispielsweise in der sensorischen Redundanz motorischer Systeme wieder (Manchester, Woollacott, Zederbauer-Hilton & Marin, 1989).

In der Altersforschung sagen vor allem zwei theoretische Perspektiven eine Zunahme von Prozessfluktuationen mit zunehmendem Erwachsenenalter voraus: Der Hypothese vom Verlust von Systemkomplexität mit dem Alter (z.B. Lipsitz, 2002), die vor allem auf physiologischen Untersuchungen beruht, und die Hypothese von der sich verringernden Effektivität neuronaler Modulation mit dem Alter, die vornehmlich auf neurocomputationalen Modellen kognitiver Altersentwicklung fußt (z.B. Li, Lindenberger & Sikström, 2001; Li & Lindenberger, 1999). Aus der Perspektive der altersverringerten Systemkomplexität wird angenommen, dass seneszente Veränderungen großer Mengen von Subsystemen einen generellen Verlust in der Robustheit eines Funktionssystems gegenüber Störungen erzeugen. Diese nachlassende Robustheit führt dazu, dass ältere Menschen in einem größeren Maße als jüngere Personen maladaptive Fluktuationen in ihren Leistungen aufweisen (Lipsitz, 2002). Zusätzlich legen Befunde aus neuronalen Netzwerkmodellen nahe, dass die altersbedingte Verringerung catecholaminerger Neuromodulation eine Verschlechterung mentaler Stimulusrepräsentation bedingt (z.B., S.-C. Li et al., 2001; S.-C. Li & Lindenberger, 1999). Es erscheint plausibel anzunehmen, dass eine in der Effizienz reduzierte Stimulusrepräsentation die Wahrnehmung von Störungen erschwert, die auf ein Funktionssystem wirken. Diese Überlegung ist im Einklang mit der theoretischen Argumentation Thalers (2002), welcher die große intraindividuelle Variabilität älterer Menschen mit einem Mangel an eindeutiger Stimuluszuordnung in Verbindung setzt. Beide Perspektiven, sowohl der Verlust an Systemkomplexität als auch die verringerte Effizienz neuromodulatorischer Aktivität, schließen sich nicht wechselseitig aus. Das größere Ausmaß von Prozessfluktuationen bei älteren Menschen im Vergleich zu jüngeren Menschen mag zu großen Teilen sowohl von dem nachlassenden Vermögen Älterer bedingt sein, eine Störung ihres Systems zu erkennen, als auch auf ihrer verringerten Fähigkeit beruhen, adaptiv auf eine Störung zu reagieren.

Empirisch wurde in vielen Studien gezeigt, dass ältere Menschen in einer großen Vielfalt unterschiedlicher kognitiver Aufgaben ein größeres Ausmaß an kognitiven Prozessfluktuationen zeigen als jüngere Menschen. In diesem Zusammenhang sind folgende Resultate besonders interessant. Erstens stellen kognitive Prozessfluktuationen reliable Maße interindividueller

Unterschiede dar, die prädiktiv sind für interindividuelle Unterschiede in psychometrischer Intelligenz über die Vorhersage von Mittelwertsunterschieden hinaus (Hultsch, MacDonald, Hunter & Dixon, 2002). Zweitens scheinen altersbedingte Unterschiede in Prozessfluktuationen in der Kognition in besonderem Maße Zeichen für seneszente Veränderungen zentralnervöser Verarbeitungsprozesse zu sein (Bunce, MacDonald & Hultsch, 2004). Auf der Verhaltensebene sind Altersunterschiede in kognitiven Prozessfluktuationen insbesondere in solchen kognitiven Aufgaben prägnant, die ein hohes Maß an exekutiver Kontrolle oder kontrollierter Aufmerksamkeit erfordern (West, Murphy, Armilio, Craik & Stuss, 2002a).

MacDonald, Nyberg, und Bäckman (in Druck) führen in einem neueren Übersichtsartikel aus, dass das Ausmaß von Prozessfluktuationen auf der neurobiologischen Ebene vermutlich multikausal bestimmt ist, dass jedoch innerhalb dieser Multikausalität der Funktionalität präfrontaler Areale eine entscheidende Bedeutung zukommt. In der vereinheitlichten Theorie der präfrontalen Funktionen, die eine systemische Perspektive einnimmt, wird exekutive Kontrolle über den inhibitorischen oder exzitatorischen Einfluss des präfrontalen Kortex auf andere Hirnregionen neurobiologisch verortet (Miller & Cohen, 2002). Der präfrontale Kortex ist eine Hirnregion, die besonders von seneszenten Veränderungen betroffen ist (Raz et al., 2005). In diesem Zusammenhang wird seit einigen Jahren die altersbedingte Abnahme in der Effektivität dopaminerger präfrontaler Neuromodulation als bedeutsamer Einflussfaktor auf Altersunterschiede in der Kognition diskutiert (Bäckman & Farde, 2004; S.-C. Li & Lindenberger, 1999). Eine neuere Studie konnte zeigen, dass bei jungen Erwachsenen das Ausmaß an Prozessfluktuationen mit dem Ausmaß präfrontaler Aktivierung korreliert (Braver, Reynolds & Donaldson, 2003). Berücksichtigt man die Tatsache, dass Altersunterschiede in Prozessfluktuationen besonders ausgeprägt sind in kognitiven Aufgaben mit hohem Anspruch an exekutive Kontrolle, erscheint es plausibel anzunehmen, dass Altersunterschiede in Prozessfluktuationen auf der neurobiologischen Ebene teilweise eine Folge mangelnder und variabler Aktivierung präfrontaler Areale sind.

In der sensomotorischen Forschung sind Prozessfluktuationen von jeher eine bedeutsame abhängige Variable (Seidler & Stelmach, 1996). Es hat sich in verschiedensten Paradigmen gezeigt, dass ältere Erwachsene signifikant größere Prozessfluktuationen in ihrer Sensomotorik aufweisen als jüngere Erwachsene (Ketcham, Seidler, Gemmert & Stelmach, 2002; Vaillancourt & Newell, 2003; Woollacott, 2000). In diesem Zusammenhang stellt insbesondere die Erforschung der altersbedingten Veränderungen des Gleichgewichtssystems eine Herausforderung dar, da die Funktionalität des Gleichgewichts eine entscheidende Determinante für die Fähigkeit ist, auch im höheren Erwachsenenalter unabhängig leben zu können (Brown & Woollacott, 1998).

Seneszente Veränderungen sind sowohl in den muskulösen und sensorischen Subsystemen als auch den peripheren Nervensystemen, die an der Gleichgewichtskontrolle beteiligt sind, nachgewiesen worden (Maki & McIlroy, 1996; Woollacott, 2000). Weiterhin weisen parietale Hirnregionen, von denen man annimmt, sie seien an der mentalen Körperrepräsentation beteiligt, negative altersbedingte Unterschiede auf der anatomischen und funktionalen Ebene auf (Labyt, et al., 2003; Tisserand et al., 2004). Vermutlich als Konsequenz all dieser Veränderungen ist die Leistung des Gleichgewichtssystems im Einklang mit den Vorhersagen der Hypothese des altersbedingten Verlustes an Systemkomplexität bei älteren Menschen gekennzeichnet von einer geringeren Komplexität und einem größerem Ausmaß an Prozessfluktuationen (Thurner, Mittermaier & Ehrenberger, 2002).

Ein weiteres Entwicklungsmerkmal sensomotorischer Leistungen ist deren zunehmende Korrelation mit kognitiven Leistungen mit zunehmendem Erwachsenenalter. Dieser Befund wurde sowohl in querschnittlichen als auch in längsschnittlichen Analysen empirisch nachgewiesen (siehe K.Z.H. Li & Lindenberger, 2002; Schäfer, Huxhold, & Lindenberger, 2006, zur Übersicht). In Doppelaufgabenexperimenten wurde gezeigt, dass ältere Erwachsene bei gleichzeitiger Bearbeitung einer kognitiven Aufgabe und Regulierung ihres Gleichgewichts stärkere Interferenzeffekte aufweisen als jüngere Erwachsene (Huxhold, Li, Schmiedek & Lindenberger, 2006). Zur Erklärung dieser zwei verwandten Entwicklungsphänomene existieren Ansätze auf unterschiedlichen theoretischen Ebenen. Die *Common Cause* Hypothese besagt, dass eine größere Interdependenz zwischen sensomotorischen und kognitiven Leistungen die Folge eines beide Leistungen limitierenden Ensembles aus Faktoren sei, die starke seneszente Veränderungen aufweisen. Als ein Faktor wird in diesem Zusammenhang die altersbedingte Verringerung effektiver dopaminerger Neuromodulation diskutiert (S.-C. Li et al., 2001). Die kognitive Permeationshypothese besagt, dass ältere Erwachsene stärker als jüngere Erwachsene exekutive Kontrolle oder Aufmerksamkeit nutzen, um die altersbedingten Defizite ihres sensomotorischen Apparates zu kompensieren (Krampe & Baltes, 2003; Lindenberger, Marsiske, & Baltes, 2000). Der Zusammenhang zwischen Kognition und Sensomotorik ist jedoch nicht monoton. Huxhold et al. (2006) zeigten in einem Doppelaufgabenexperiment, dass der Einfluss von Aufmerksamkeit die Gleichgewichtsleistung sowohl verschlechtern als auch verbessern kann. Nach Auffassung der Autoren ist die Interaktion zwischen Gleichgewicht und Kognition mit einem dualen Prozessmodell kognitiver Permeation zu erklären. Ist die für die Regulation des Gleichgewichts benötigte Aufmerksamkeit gering, führt Aufmerksamkeit, die auf die Balance gerichtet wird, zu einer Interferenz mit hoch automatisierten Prozessen und in der Folge zu einer Verschlechterung der Gleichgewichtsleistung. Bei einem großen Bedarf an Aufmerksamkeit konkurrieren die kognitive Aufgabe und das Gleichgewichtssystem um die gemeinsame

Ressource Aufmerksamkeit. Die Interaktion zwischen Gleichgewicht und Kognition ist also invers U-förmig. Mit steigendem Bedarf an Aufmerksamkeit verbessert sich zunächst die Gleichgewichtsleistung, da weniger Aufmerksamkeit mit automatisierten Prozessen interferieren kann. Steigt der Bedarf über einen kritischen Punkt hinaus, verschlechtert sich die Gleichgewichtsleistung jedoch auf Grund der Konkurrenz der kognitiven und sensomotorischen Aufgaben um die verfügbare Aufmerksamkeit. Die optimale Gleichgewichtsleistung ergibt sich bei einem Bedarf an Aufmerksamkeit, in dem sich beide Prozesse die Waage halten. Dieser optimale Punkt ist jedoch interindividuell verschieden. Ältere Erwachsene haben einen größeren Bedarf in ihrer Gleichgewichtskontrolle an Aufmerksamkeit und geringere Ressourcen an Aufmerksamkeit als jüngere Erwachsene. Bei älteren Erwachsenen ist daher die Wahrscheinlichkeit für die Konkurrenz um Aufmerksamkeit zwischen Gleichgewichtskontrolle und Kognition bei gleicher nomineller Aufgabenschwierigkeit größer als bei jüngeren Erwachsenen.

Die Erforschung von Geschlechtsunterschieden in der Gleichgewichtskontrolle hat bis dato weniger empirisches Interesse geweckt als die Untersuchung von Altersunterschieden. Zudem ergibt die Sichtung der veröffentlichten Studien zum Thema Geschlechtsunterschiede in der Balance eine eher diffuse Befundlage. In der Tendenz scheinen Frauen jedoch beim einfachen Stehen ohne experimentelle Störungen der Balance über ein besseres Maß an Gleichgewichtskontrolle zu verfügen als Männer. Dieser Befund wird von einzelnen Autoren unterschiedlich erklärt. Eine Erklärung ist die im Durchschnitt geringere Körpergröße von Frauen im Verhältnis zu Männern, die einen im Durchschnitt tieferen Körperschwerpunkt bei Frauen impliziert, der wiederum die Gleichgewichtsregulation vereinfacht (Hageman, Leibowitz & Blanke 1995). Eine psychologisch interessantere Erklärung basiert auf Befunden, die anzeigen, dass Männer in einem größeren Maße als Frauen abhängig scheinen von der visuellen Kontrolle ihrer Gleichgewichtsleistung (Golomer, Dupui & Monod, 1997). Sollte der letztgenannte Ansatz richtig sein, würde er implizieren, dass Männer auch in einem größeren Maße kognitiver Kontrolle ihres Körpergleichgewichts bedürfen als Frauen, denn die Integration sensorischer Information ist korreliert mit einem hohen Bedarf an exekutiver Kontrolle (Teasdale & Simoneau, 2001). Gerade bei älteren Männern könnte die Interaktion von hohem visuellen Kontrollbedarf und einem generellen altersbedingten Defizit in der Gleichgewichtskontrolle zu einem verstärkten Bedürfnis an Aufmerksamkeit in der Gleichgewichtsregulation führen.

Wie eingangs erwähnt befasste sich diese Dissertation mit Prozessfluktuationen in der Gleichgewichtskontrolle. Die Erfassung der Gleichgewichtsleistung erfolgt häufig mit Hilfe von Posturographiegeräten, die das Ausmaß der Variabilität der Schwankungen des Körpers während des Stehens in einem Messdurchlauf bestimmter Dauer erfassen. Demzufolge bezieht sich ein Großteil der empirischen Forschung zur Gleichgewichtskontrolle auf Unterschiede im Ausmaß



von Prozessfluktuationen in der Gleichgewichtsregulation auf einer kurzen Zeitskala. Prozessfluktuationen in der Gleichgewichtskontrolle auf längeren Zeitskalen etwa zwischen verschiedenen Durchläufen oder zwischen verschiedenen Tagen sind bis dato noch kaum untersucht. Diese Lücke in der empirischen Forschung ist einigermaßen überraschend, wenn man in Betracht zieht, wie wichtig gerade für ältere Menschen die Regulierung von Prozessfluktuationen in der Körperbalance ist.

Es war eine Grundannahme dieser Arbeit, dass Prozessfluktuationen aus Störungen im Gleichgewichtsregulationsprozess resultieren. Störungen können unterschiedliche Zeitskalen und unterschiedliche Ursachen haben, die entweder von innerhalb des Organismus oder aus der Umwelt stammen können (z.B. kurzfristige Konzentrationssprünge im Vergleich zu täglich variierender Schlafqualität), deshalb können auch Prozessfluktuationen unterschiedliche Zeitskalen haben. Aus diesen Gründen wurden in dieser Arbeit Prozessfluktuationen auf drei Zeitskalen unterschiedlicher Länge behandelt. Prozessfluktuationen von einem Moment zum nächsten, zwischen experimentellen Durchgängen und zwischen Tagen wurden untersucht. Im Einklang mit der Hypothese des Verlustes der Systemkomplexität mit dem Alter (Lipsitz, 2002) und der Hypothese der verringerten neuromodulatorischen präfrontalen Aktivität (S.-C. Li et al., 2001; S.-C. Li & Lindenberger, 1999) wurde in dieser Arbeit ein generelles Nachlassen der Systemrobustheit in der Gleichgewichtskontrolle postuliert. Da angenommen wurde, dass auf Grund der altersbedingten nachlassenden Robustheit des Gleichgewichtssystems ältere Menschen anfälliger sind gegenüber Störungen als jüngere Erwachsene, wurden stärkere Prozessfluktuationen älterer Erwachsene im Vergleich zu jüngeren Personen auf allen drei Zeitebenen postuliert. Weiterhin wurde untersucht, ob sich Geschlechtsunterschiede nicht nur in Prozessfluktuationen von einem Moment zum nächsten sondern auch zwischen verschiedenen experimentellen Durchgängen und verschiedenen Tagen nachweisen ließen. Im Falle von Geschlechtsunterschieden auf allen drei Zeitebenen hätte dies auf eine generelle weibliche Überlegenheit in der Robustheit des Gleichgewichtssystems hingewiesen.

Mögliche Ursachen für Störungen des Gleichgewichtssystems sind mannigfaltig und eine umfassende Analyse war jenseits der Möglichkeiten dieses Dissertationsprojektes. Deshalb konzentrierte sich diese Arbeit auf den Zusammenhang zwischen täglichen Prozessfluktuationen in exekutiver Kontrolle und der Gleichgewichtsregulation. Sowohl die *Common Cause* Hypothese als auch die kognitive Permeationshypothese sagen vorher, dass die Interdependenz zwischen sensorischen und kognitiven Leistungen im Alter zunimmt. Aus diesen Gründen wurde postuliert, dass auch Fluktuationen von Tag zu Tag in beiden Bereichen stärker bei älteren Menschen miteinander korreliert sind als bei jüngeren Erwachsenen. Wie im Vorangegangenen dargelegt, lässt sich im Falle einer größeren Dependenz des Gleichgewichtssystems von visueller

Kontrolle bei Männern im Gegensatz zu Frauen von einer starken Interaktion sensomotorischer und kognitiver Prozesse gerade bei älteren Männern ausgehen. Aus diesen Gründen wurden Geschlechtsunterschiede mit in die Analyse interindividueller Unterschiede in der Interrelation zwischen Prozessfluktuationen in der Gleichgewichtskontrolle und der Kognition einbezogen.

Lebensspannenforscher haben seit langem darauf hingewiesen, dass häufig hinsichtlich der entwicklungspsychologischen Theorienbildung und des in der entwicklungspsychologischen Empirie verwendeten Datenmaterials eine fundamentale Divergenz besteht (Baltes, Reese & Nesselroade, 1988; Molenaar, Huizenga & Nesselroade, 2003). Theoretische Erklärungen empirischer Phänomene zielen häufig auf Prozesse ab, die innerhalb eines Individuums ablaufen. In der empirischen Praxis wird jedoch häufig intraindividuelle Variabilität, in der sich intrapersonale Mechanismen abbilden sollten, durch interindividuelle Unterschiede substituiert. Formal ist eine solche Substituierung nur unter ganz bestimmten Bedingungen legitim. In diesem Zusammenhang ist möglicherweise gerade die Validität korrelativer Analysen über die zunehmende Stärke des Zusammenhangs zwischen Sensomotorik und Kognition mit zunehmenden Alter von der Verletzung dieser formalen Annahmen betroffen, da die veröffentlichten Studien sich bis dato nahezu ausschließlich mit der Analyse interindividueller Unterschiede befassten. So ist unter der Annahme von Gaußschen Entwicklungsprozessen die Äquivalenz von intraindividuelle Variabilität und interindividuelle Variabilität nur gegeben bei zeitlicher Invarianz der Varianz-Covarianz-Struktur (Molenaar, 2004; Molenaar et al., 2003). Im Weiteren bedingt die Varianzäquivalenz, dass sich ein gefundener Zusammenhang zwischen Variablen nicht signifikant zwischen Personen unterscheidet. Aus der Sicht der kognitiven Permeationshypothese ist diese Annahme sehr unwahrscheinlich. Aus der Perspektive kognitiver Permeation ist der Einfluss kognitiver Prozesse abhängig vom Status des sensomotorischen Systems. Dieser wiederum wird beeinflusst von seneszenten Veränderungen in einer Vielzahl unterschiedlicher Subsysteme. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Veränderungen für alle Personen die gleiche Stärke haben und zeitgleich einsetzen, kann man selbst in einem eingeschränkten Altersbereich als minimal ansehen. Aus den oben genannten Gründen wurde in dieser Dissertation ein personenorientierter Ansatz zur Evaluation des Zusammenhangs von Gleichgewichtskontrolle und Kognition gewählt. Mit Hilfe von Mehrebenenmodellen wurden auf der ersten Analyseebene die Zusammenhänge zwischen Prozessfluktuationen in der Gleichgewichtskontrolle und Kognition innerhalb von Personen analysiert bei gleichzeitiger Betrachtung der interindividuellen Unterschiede in diesen intraindividuellen Zusammenhängen auf der zweiten Analyseebene.

Die Daten, auf denen der empirische Teil dieser Arbeit beruht, stammen aus dem Intra-Person Dynamics Project, das am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung durchgeführt

wurde (S.-C. Li, Lindenberger & Smith, 2005). Alle Studienteilnehmer dieses Projektes durchliefen eine umfassende dreitägige Eingangserhebung. In dieser Ersterhebung wurden physiologische Daten, Persönlichkeitsdaten und psychometrische Intelligenzdaten zur Stichprobenbeschreibung erhoben. Im Anschluss an die Basiserhebung wurden die Studienteilnehmer zu 45 aufeinander folgenden täglichen Sitzungen eingeladen. Die täglichen Sitzungen erfolgten an den Wochentagen und dauerten jeweils eine Stunde.

Eine Gruppe von 18 jungen Erwachsenen ( $M_{\text{Alter}} = 25,5$  Jahre) und eine Gruppe von 18 älteren Erwachsenen ( $M_{\text{Alter}} = 74,19$  Jahre), die zu gleichen Teilen aus Frauen und Männern bestanden, bildeten die Analytestichprobe. Stichprobenselektionsanalysen ergaben, dass sich diese Stichprobe nicht oder nur unwesentlich hinsichtlich ihrer intellektuellen Fähigkeiten von einer alterskompatiblen Stichprobe aus einer konventionelleren Querschnittsstudie unterschied. Im Durchschnitt absolvierten die Studienteilnehmer 99,38% aller täglichen Sitzungen.

Zur Erfassung der täglichen Schwankungen in der Kognition wurde eine räumliche Arbeitsgedächtnisaufgabe herangezogen. In dieser Aufgabe erschienen mit einem fixen zeitlichen Abstand 22 Punkte nacheinander in den äußeren acht Feldern eines Gitters aus 3x3 Zellen (das mittlere Feld blieb ungenutzt). Die Studienteilnehmer mussten jeden Punkt, der angezeigt wurde, um ein Feld in Uhrzeigerrichtung verschieben und sich dessen verschobene Position merken. Die Teilnehmer identifizierten die Position eines neu erschienen Punktes als gleich, wenn dessen Position im Gitter der verschobenen Position des vorletzten Punktes in der Sequenz entsprach. In allen anderen Fällen sollten die Probanden die Punkte als nicht gleich identifizieren. Der Index der täglichen Prozessfluktuationen in der räumlichen N-Back Aufgabe wurde aus den Abweichungen der Tagesmittelwerte der korrekten Reaktionszeiten von den individuell vorhergesagten Trends über die gesamten 45 Erhebungstage gebildet.

Die Messung der Gleichgewichtskontrolle wurde auf einem Posturografiegerät in einem auf den jeweiligen Studienteilnehmer zugeschnittenen Beinahe-Tandemstand in zwei experimentellen Bedingungen durchgeführt. Die Fläche der Körperschwankungen in einem Experimentaldurchgang von 68 Sekunden bildete den Index für Prozessfluktuationen in der Gleichgewichtsregulierung von einem Moment zum nächsten. Die Standardabweichung über die fünf Durchgänge, die an einem Tag in einer experimentellen Bedingung erhoben wurden, stellte das Maß der Prozessfluktuationen zwischen verschiedenen Durchgängen dar. Die absoluten Abweiche der Tagesmittelwerte vom vorhergesagten Trend über die gesamten 45 Erhebungstage ergaben die Prozessfluktuationen von Tag zu Tag. Die Gleichgewichtskontrolle wurde zum einen in einer experimentellen Bedingung erhoben, in der die Teilnehmer so still wie möglich standen, und zum anderen in einer Bedingung erfasst, in der das ruhige Stehen mit der gleichzeitigen Bearbeitung der räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe verknüpft war.

Die empirischen Analysen ergaben, dass ältere Erwachsene nicht nur auf der Ebene von Prozessfluktuationen von Moment zu Moment, sondern auch von Durchlauf zu Durchlauf und von Tag zu Tag in beiden experimentellen Bedingungen stärkere Leistungsschwankungen in der Gleichgewichtskontrolle zeigen als jüngere Menschen. ANCOVA-Analysen zeigten, dass Altersunterschiede in Prozessfluktuationen in den beiden letztgenannten Zeitskalen, zu einem Großteil auf der Basis der interindividuellen Unterschiede in Prozessfluktuationen von einem Moment zum nächsten vorhergesagt werden können. In diesem Kontext muss jedoch erwähnt werden, dass eine weitergehende Analyse zeigte, dass die Zusammenhänge zwischen Prozessfluktuationen von einem Moment zu nächsten und zwischen verschiedenen Durchläufen signifikant zwischen Personen variierten. Dieser Befund ließ generell an einer Strategie zweifeln, die auf der Analyse von interindividuellen Unterschieden in Prozessfluktuationen auf verschiedenen Zeitebenen beruht. Jedoch wiesen ältere Erwachsene auch nach einer statistischen Kontrolle von Prozessfluktuationen von einem Moment zum nächsten, die innerhalb von Individuen durchgeführt wurde, größere Fluktuationen zwischen verschiedenen Durchläufen auf als jüngere Erwachsene. Die berichteten Resultate erlauben den theoretischen Schluss, dass seneszente Veränderungen in der beteiligten Subsystemen der Gleichgewichtsregulation zu einem allgemeinen altersbedingten Verlust in den Systemrobustheit führen, welcher sich in Prozessfluktuationen auf mehreren Zeitebenen niederschlägt.

Die Analysen zu Geschlechtsunterschieden in Prozessfluktuationen der Gleichgewichtskontrolle ergaben, dass Frauen nur auf der Momentebene signifikant weniger fluktuierten als Männer. Diese Befunde wurden dahingehend interpretiert, dass der weibliche Vorteil in der Regulation von Körperschwankungen zu einem großen Teil auf eine geringere durchschnittliche Körpergröße von Frauen im Verhältnis zu Männern zurückzuführen ist und nicht notwendigerweise ein Zeichen für eine größere Systemrobustheit darstellt.

Mehrebenenmodelle zeigten einen signifikanten durchschnittlichen intraindividuellen Zusammenhang zwischen Prozessfluktuationen von Tag zu Tag in der Gleichgewichtsregulation, die keine gleichzeitige Bearbeitung der kognitiven Aufgabe beinhaltete, und der räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe, die im Sitzen durchgeführt wurde. Die intraindividuellen Zusammenhänge variierten zwischen Personen sowohl in der Stärke als auch im Vorzeichen. Entgegen den Erwartungen erklärte Alter keine reliable Varianz in den interindividuellen Unterschieden intraindividuellen Zusammenhänge auf. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass das chronologische Alter vermutlich eine schlechtere Approximation der relevanten Entwicklungsprozesse darstellt als der Status des Gleichgewichtssystems oder der Status des kognitiven Systems. Deshalb wurden weitergehende Analysen der interindividuellen Unterschiede der intraindividuellen Zusammenhänge zwischen Fluktuationen in der Gleichgewichtsleistung

und der Kognition durchgeführt. Die Stärke und die Richtung der intraindividuellen Zusammenhänge standen in Relation zum individuellen Status der Gleichgewichtsleistung nicht jedoch in einem signifikanten Zusammenhang zur individuellen kognitiven Leistung. Diese Befunde lassen sich in ihrer Vollständigkeit besser aus der Perspektive eines Zweiprozessmodells kognitiver Permeation erklären als aus Sicht der *Common Cause* Hypothese. Für Individuen mit geringem Bedarf an Aufmerksamkeit in ihrer Gleichgewichtsregulation führt ein Mehr an Aufmerksamkeit an einem „guten“ Tag zu einer stärkeren Interferenz mit automatischen Regulationsprozessen. In der Folge ist bei diesen Personen mit guter Körperbalance die intraindividuelle Korrelation zwischen Prozessfluktuationen in der Gleichgewichtsleistung und der Kognition negativ. Für Personen mit relativ schwacher Gleichgewichtsleistung ist die intraindividuelle Korrelation zwischen den beiden funktionalen Bereichen positiv. Diese Individuen können ein Mehr an Aufmerksamkeit an „guten“ Tagen nutzen, um ihre sensomotorischen Defizite zu kompensieren. In diesem Zusammenhang ist es interessant zu erwähnen, dass der durchschnittliche Zusammenhang zwischen Prozessfluktuationen von Tag zu Tag in der Gleichgewichtskontrolle und der räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe signifikant stärker positiv war in älteren Männern als im Durchschnitt aller anderen Gruppen. Dieser Befund kann vorsichtig dahingehend interpretiert werden, dass die stärkere Dependenz von visueller Kontrolle der männlichen Gleichgewichtsregulation mit seneszenten Veränderungen des Gleichgewichtssystems interagiert. Diese Interaktion erhöht die Wahrscheinlichkeit der Nutzung von kognitiven Ressourcen zur Kompensation sensomotorischer Defizite.

Die Psychologie der Lebensspanne fordert seit langem, dass die Analyse von Entwicklungsprozessen beim Individuum ansetzen muss (Baltes et al., 1988). Im Einklang mit einer Betrachtungsweise von entwicklungsbedingten Veränderungen, welche die individuumsspezifische und multivariate Natur von Entwicklung berücksichtigt, steht die Forderung, den gesamten Raum intraindividuelle Entwicklung zu beschreiben und zu erklären (Nesselroade, 1991). Zu diesem Zweck ist das Verständnis der intrapersonalen Mechanismen aus Sicht der Lebensspannenpsychologie grundlegende Voraussetzung, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Entwicklungsverläufen zu analysieren (Lindenberger & Oertzen, 2006). Diese Dissertation sollte zu diesen Aufgaben beitragen, in dem sie zunächst intraindividuelle Variabilität in der Gleichgewichtsleistung auf drei verschiedenen Zeitskalen beschrieb und altersbezogene Unterschiede in diesen Variabilitäten analysierte und im zweiten Schritt den altersbezogenen Zusammenhang zwischen sensomotorischen und kognitiven Leistungen auf der Basis einzelner Personen untersuchte. Obwohl die empirischen Analysen bestehenden Theorien zur altersbezogenen Veränderung des Zusammenhangs zwischen Sensomotorik und Kognition grundsätzlich nicht widersprachen, wurden interindividuelle Unterschiede in den intraindividuel-

len Korrelationen zwischen beiden Bereichen gefunden. Diese Dissertation drückte die Hoffnung aus, dass zukünftige Entwicklungsmodelle der Sensomotorik und der Interaktion sensomotorischer und kognitiver Prozesse interindividuellen Unterschieden in intraindividuellen Variabilitäten und Kovarianzen in einem stärkeren Maße Rechnung berücksichtigen als zuvor.