

# **Einfluss der Präparation und Reihenfolge auf die antizipativen und kompensatorischen posturalen Anpassungen zur Reaktion auf posturale Störungen bei jungen Erwachsenen**

Abschlussarbeit zur Erlangung des  
Master of Science in Sportwissenschaften  
Option Unterricht

eingereicht von

**Nathalie Meier**

an der  
Universität Freiburg, Schweiz  
Mathematisch-Naturwissenschaftliche und Medizinische Fakultät  
Abteilung Medizin  
Departement für Neuro- und Bewegungswissenschaften

in Zusammenarbeit mit der  
Eidgenössischen Hochschule für Sport Magglingen

Referent  
Prof. Dr. Wolfgang Taube

Betreuer  
Dr. Michael Wälchli

Freiburg, April 2020

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
1 Einleitung .....	4
1.1 Posturale Kontrolle .....	4
1.2 Posturale Störungen .....	5
1.3 Posturale Kontrollstrategien .....	6
1.4 Posturale Reaktionen auf unterschiedliche Störungen .....	9
1.5 Ziel der Arbeit .....	29
2 Methode .....	31
2.1 Stichprobe .....	31
2.2 Design der Studie .....	31
2.3 detaillierter Beschrieb der Untersuchungsmethoden und –instrumente .....	32
2.4 Auswertung und statistische Analyse der Daten .....	35
3 Resultate .....	37
3.1 EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung .....	37
3.2 Winkel des Fuss-, Knie- und Hüftgelenks vor der Störung .....	38
3.3 Start der EMG-Aktivität nach der Störung .....	38
3.4 EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung .....	39
3.5 Maximale Winkelveränderung des Fussgelenks nach der Störung .....	40
3.6 Maximale Winkelveränderung des Hüftgelenks nach der Störung .....	41
4 Diskussion .....	42
4.1 Posturale Reaktionen vor der Störung .....	42
4.2 Posturale Reaktionen nach der Störung .....	44
5 Schlussfolgerung .....	48
Literatur .....	49

## Zusammenfassung

Die posturale Kontrolle ist eine komplexe motorische Fähigkeit des menschlichen Körpers, um die Körperposition unter dem Einfluss der Schwerkraft aufrecht zu halten und ergibt sich aus einem Zusammenspiel mehrerer dynamischen sensomotorischen Prozessen des zentralen Nervensystems (ZNS) (Taube, 2013). Das ZNS bedarf einer Feedforward- und Feedback-Kontrolle, damit die posturale Kontrolle nach posturalen Störungen wiederhergestellt werden kann. Die Feedforward-Kontrolle beinhaltet antizipatorische posturale Anpassungen (APA: anticipatory postural adjustment), welche dem ZNS erlauben, sich vor der Störung vorzubereiten. Die Feedback-Kontrolle setzt nach der Störung ein und beinhaltet kompensatorische posturale Anpassungen (CPA: compensatory postural adjustment) (Santos et al., 2010a). Die posturalen Störungen können in Präparation und Reihenfolge unterteilt werden, welche sich in der zeitlichen Vorhersehbarkeit des Starts der Störung, der Störungsinisierung und der Störungsrichtung unterscheiden. Die Präparation und die Reihenfolge beeinflussen die Generierung der APAs (Aruin & Latash, 1995; Hay & Redon, 1995), welche das damit verbundene Muskelaktivierungsmuster (Piscitelli, Falaki, Solnik & Latash, 2017; Santos, Kanekar & Ariun, 2010a) und die Positionierung der Körpersegmente (Horak & Nashner, 1986; Santos, Kanekar & Ariun, 2010b) vor der Störung aktiviert. Wenn APAs generiert werden, sind die CPAs nach posturalen Störungen geringer. Die vorliegende Arbeit untersuchte die Fragestellung, inwiefern die Präparation und die Reihenfolge Einfluss auf die antizipativen und kompensatorischen posturalen Anpassungen zur Reaktion auf posturale Störungen bei jungen Erwachsenen hat. Dafür waren 40 junge Erwachsene sechs unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt, wobei jede Präparation (*self*, *known*, *unknown*) in beiden Reihenfolgen (*blocked*, *random*) untersucht wurde. Die 3x2-ANOVA zeigte bei der Bedingung *self blocked* vor der Störung die höchste EMG-Aktivität bei -50 ms bis zum Start der Störung. Im Vergleich zu den anderen Bedingungen konnte nach der Störung bei *self blocked* zudem der früheste Start der EMG-Aktivität, die tiefste EMG-Aktivität 50 – 250 ms und die kleinste Winkelveränderung im Fussgelenk gezeigt werden. Bei *self blocked* konnte sich das ZNS vollständig auf die eintreffende posturale Störung vorbereiten und generierte spezifische APAs, woraus kleine CPAs folgten. Wurde mindestens ein Faktor verändert, wie bei *self random*, *known blocked* und *known random*, so waren die APAs unspezifischer, welche grösseren CPAs auf die Störung bedurften. Bei der zeitlich unvorhersehbaren Präparation *unknown*, war die Reihenfolge unwichtig. Das ZNS konnte sich nicht auf den Start der Störung vorbereiten, wodurch keine APAs generiert werden konnten. Daher mussten grosse CPAs eintreffen, um die posturale Kontrolle wiederherzustellen.

## **1 Einleitung**

Die Welt, in welcher unser Körper agiert, besteht aus unzähligen unterschiedlichen Situationen, Möglichkeiten und Umgebungen. Um in dieser variablen und auch unvorhersehbaren Welt interagieren zu können, bedarf es einem leistungsfähigen und flexiblen System der Haltungskontrolle. Durch die Haltungskontrolle ist der menschliche Körper zum Beispiel fähig, aus dem Sitzen aufzustehen, eine aufrechte Körperposition zu halten, wie auch einen Schritt zu tätigen, ohne umzufallen.

Laut Statistik der Beratungsstelle für Unfallverhütung (BFU) Status 2019, stürzten in den Jahren 2012 – 2016 durchschnittlich rund 286'120 Menschen während Haushalts-, Freizeit- und Gartenaktivitäten, die sich dabei verletzten. Der Sturz ist somit der häufigste Unfallhergang in Haus und Freizeit in der Schweiz, wobei durchschnittlich 1'650 Menschen an den Folgen sterben, welche zu 95% über 65 Jahre alt sind. Die Statistik zeigt auch, dass mit zunehmendem Alter die Stürze absolut gesehen zunehmen und eher die weiblichen Personen betroffen sind. Der Sturzhergang ist zu 60% auf gleicher Ebene, zu 20% aus der Höhe, zu 18% auf der Treppe oder Stufe zurückzuführen. 2% beziehen sich auf andere Stürze (BFU, 2019).

Da der Mensch das einzige Säugetier mit einem bipedalen Gang ist, muss der hohe Körperschwerpunkt immer über einer kleinen Unterstützungsfläche ausbalanciert werden, damit er aufrecht stehen kann. Dafür ist die posturale Kontrolle, unser Haltungssystem, zuständig. Das Haltungssystem arbeitet auf einer automatisierten Ebene, sodass wir uns dieser anspruchsvollen sensomotorischen Leistung nicht bewusst sind. Die Komplexität der posturalen Kontrolle wird uns meistens erst bewusst, wenn wir die Erfahrung auf einem instabilen Untergrund machen oder nach einer Verletzung über die Körperhaltung nachdenken müssen (Taube, 2013).

### **1.1 Posturale Kontrolle**

Die posturale Kontrolle ist die Fähigkeit des menschlichen Körpers, unter dem Einfluss der Schwerkraft die Körperposition aufrecht zu halten, indem der hohe Körperschwerpunkt über einer Unterstützungsfläche gehalten wird (Horak, 1987). Horak (2006) unterscheidet zwischen zwei Hauptfunktionszielen, der posturalen Orientierung und dem posturalen Gleichgewicht (Horak, 2006).

Die posturale Orientierung bezieht sich auf die Positionierung des Körpers und der Körpersegmente und beinhaltet die aktive Kontrolle der Körperausrichtung und des Körpertonus in Bezug auf die Schwerkraft, Auflagefläche, visuelle Umgebung und internen Referenzen. Zusätzlich basiert die posturale Orientierung auf der Interpretation der konvergenten sensorischen

Informationen aus somatosensorischen, vestibulären und visuellen Systemen, welche je nach Ziel der Bewegungsaufgabe und Umgebungskontext unterschiedlich gewichtet werden. Das posturale Gleichgewicht beinhaltet die Koordination sensomotorischer Strategien zur Stabilisierung des Körpermittelpunktes sowohl bei selbst-initiierten, als auch bei extern-initiierten Störungen der posturalen Stabilität. Die Reaktionsstrategie ist abhängig von der Erwartung, Vorerfahrung und Zielen des Individuums. Die Komplexität der Aufgabe und die Fähigkeit des Kontrollsystems haben Einfluss auf den Umfang der kognitiven Verarbeitung, welche für die posturale Kontrolle notwendig ist. Ein stabiles posturales System ist nach einer Störung fähig, in seinen Gleichgewichtszustand zurückzukehren (Horak, 2006).

Die posturale Kontrolle ist demnach eine komplexe motorische Fähigkeit und ergibt sich aus dem Zusammenspiel mehrerer dynamischen sensomotorischen Prozessen des zentralen Nervensystems (ZNS) (Taube, 2013).

## 1.2 Posturale Störungen

Verschiebungen des Körperschwerpunktes, also Bewegungen des Körpers durch einen Impuls, werden als posturale Störungen oder Haltungsstörungen bezeichnet. Solche posturale Störungen können in zwei Kategorien, nämlich die Präparation und Reihenfolge, unterteilt werden (siehe Tabelle 1).

Die Präparation beschreibt die Störungsiniiierung, welche entweder selbst-initiiert oder extern-initiiert wird. Sie beschreibt ebenfalls die zeitliche Vorhersehbarkeit, welche definiert, ob die Störung zeitlich vorhersehbar oder unvorhersehbar ist. Die selbst-initiierten Störungen sind zeitlich immer vorhersehbar, da die Person die Störung direkt selbst auslöst. Die extern-initiierten Störungen können sowohl zu vorhersehbaren, wie auch zu unvorhersehbaren Zeitpunkten auftreten. Die Reihenfolge beschreibt die Störungsrichtung. Ist die Störungsrichtung bekannt, dann wird von einer antizipierten Störungsrichtung gesprochen. Wenn die Störungsrichtung unbekannt ist, so wird diese nicht-antizipierte Störungsrichtung genannt (Wälchli, 2018).

Tabelle 1.

*Übersicht der unterschiedlichen posturalen Störungseigenschaften, aufgeteilt in Präparation und Reihenfolge*

Präparation	Reihenfolge	Störungseigenschaften
self	blocked	selbst-initiiert, zeitlich vorhersehbar, antizipierte Störungsrichtung
	random	selbst-initiiert, zeitlich vorhersehbar, nicht-antizipierte Störungsrichtung

known	blocked	extern-initiiert, zeitlich vorhersehbar, antizipierte Störungsrichtung
	random	extern-initiiert, zeitlich vorhersehbar, nicht-antizipierte Störungsrichtung
unknown	blocked	extern-initiiert, zeitlich unvorhersehbar, antizipierte Störungsrichtung
	random	extern-initiiert, zeitlich unvorhersehbar, nicht-antizipierte Störungsrichtung

---

Die beiden Kategorien sind entscheidend, um vollständig verstehen zu können, wie sich der menschliche Körper vorbereitet und entsprechend reagieren wird. Jede Störung, welche den Körperschwerpunkt aus der Unterstützungsfläche verschiebt, ruft eine Haltungs- und Muskelreaktion hervor, damit der Körper nicht fällt. In unerwarteten Situationen treffen solche Reaktionen zu spät oder zu unspezifisch ein, was zu einem Sturz führen kann. Im Gegensatz zu diesen feedbackgenerierenden Reaktionen sind vorbereitende Massnahmen zum Ausgleichen der Störung von der Präparation und der Reihenfolge abhängig. Das Wissen über ein bevorstehendes Ereignis ermöglicht die Erzeugung von reibungsloseren Reaktionen auf die posturale Störung, da die Reaktion genau vorbereitet werden kann (Wälchli, 2018).

### 1.3 Posturale Kontrollstrategien

Posturale Kontrollstrategien werden über Feedback- und Feedforward-Prozesse gesteuert. Wälchli (2018) hat dazu ein einleuchtendes Beispiel gemacht: Ein Downhill-Radfahrer fährt das erste Mal in seinem Leben eine Strecke hinunter. Die bevorstehende Strecke ist dem Fahrer daher unbekannt. Ebenso wenig kennt er die weiterführende Strecke nach einer blinden Kurve. Er ist gezwungen nach der blinden Kurve sofort zu reagieren, indem er bremst oder beschleunigt und direkt in einen angemessenen Gang schaltet, um die wahrgenommenen Eigenschaften der Strecke zu bewältigen. Solche Anpassungen werden als reaktive Kontrolle oder Feedback-Kontrolle bezeichnet. Wenn der Fahrer die Strecke mehrmals abgefahren hat, so erwarb dieser ein Wissen (Erfahrung) über die Strecke und ist in der Lage, bereits vor der blinden Kurve angemessen auf die weiterführende Strecke zu reagieren, bspw. im Voraus in den angemessenen Gang zu schalten. Der Fahrer ist nun in der Lage, geeignete Vorbereitungsmaßnahmen zu treffen, welche als vorausschauende Kontrolle oder Feedforward-Kontrolle bezeichnet wird (Wälchli, 2018).

Die nächsten beiden Abschnitte beschreiben die beiden Kontrollmodi, wobei ein besonderer Fokus auf die posturale Reaktion auf unterschiedliche Störungen gelegt wird.

**1.3.1 Feedback-Kontrolle.** Die Feedback-Kontrolle spielt eine wichtige Rolle in Situationen, die vorher nie erlebt wurden oder unvorhersehbar sind (Wälchli, 2018). Die Feedback-Kontrolle beinhaltet kompensatorische Haltungsanpassung (CPA: compensatory postural adjustment) und beschreibt die Reaktionszeit, welche für die Wiederherstellung des Gleichgewichts nach einer Störung benötigt wird (Santos, Kanekar & Ariun, 2010a). Sie basiert auf einer sensorischen Rückkopplung und wird im Kortex verarbeitet. Bei freiwilligen Bewegungen senden kortikale Motorbereiche einen Motorbefehl aus, welcher die Muskelfasern hervorruft, um eine Bewegung zu initiieren. Bei extern-initiierten, unfreiwilligen Bewegungen wird der Muskel willkürlich gedehnt, ohne dass ein absteigender (efferenter) Befehl des Kortex vorliegt, was bedeutet, dass die Verarbeitungsschleife in der Propriozeption beginnt. Das propriozeptive System (Muskelspindeln) erfasst die Längen- und Positionsänderungen des Muskels und gibt dem ZNS, durch das afferente Feedback, Auskunft über den aktuellen Zustand des Körpers (Wälchli, 2018).

Allgemein wird das afferente Feedback von den Muskelspindeln an das Rückenmark und weiter an das Gehirn geleitet. Je nach notwendiger Kontrollstufe, das heisst spinal (Rückenmark) oder kortikal (Gehirn), gibt es Unterschiede in der Verarbeitungszeit. Die schnellstmögliche Feedbackreaktion entsteht auf der Wirbelsäulenebene. Dies ist die erste muskuläre Reaktion, die Kurzzeitreaktion (SLR: short latency response), welche ca. 30 – 60 ms nach einer Störung eintritt (Wälchli, 2018). Die SLR, auch Reflexantwort genannt, ruft eine kurzzeitige Aktivierung der distalen Beinmuskulatur hervor. Dabei wird ein mono- oder oligosynaptischer segmentaler Kreislauf aktiviert, welcher von der Anfangsbedingung der Störung abhängt (Ackermann, Dichgans & Guschlbauer, 1991). Isoliert betrachtet ist der Beitrag des Rückenmarks jedoch minimal, da die SLR alleine für die Stabilisierung des Gleichgewichts zu klein ist (Jacobs & Horak, 2007). Im Anschluss auf die SLR tritt die mittlere Latenzreaktion (MLR: medium latency response) ca. 60 – 85 ms nach der Störung ein. Die SLR und MLR sind beide spinal erzeugte Reaktionen der Muskeln mit einem anderen Ursprung. Die SLR wird von den afferenten Ia-Fasern und die MLR von den afferenten Typ-II-Fasern hervorgerufen. Die SLR und MLR können vom Gehirn beeinflusst werden, bspw. durch eine präsynaptische Hemmung vor der Muskeldehnung, wobei das Gehirn nur «aktiv» sein kann. Die späteste Reaktion ist die Langzeitreaktion (LLR: long latency response), welche nach 85 – 120 ms eintritt und kortikal vermittelt ist (Wälchli, 2017). Die kortikale Beteiligung nimmt mit steigender Latenzzeit zu (Jacobs & Horak, 2007).

Die Auswirkung der Störung beeinflusst die Art und die Amplitude der Reaktion und kann durch die Erfahrung und Erwartung angepasst werden. Das menschliche System ist also in der

Lage, die Störungseigenschaften zu antizipieren und die kompensatorischen Reaktionen angemessen vorzubereiten (Wälchli, 2018).

**1.3.2 Feedforward-Kontrolle.** Im Gegensatz zu der Feedback-Kontrolle, welche die Informationen von den Sinnesrezeptoren benötigt, arbeitet die Feedforward-Kontrolle ohne Feedback und ist in Situationen mit Vorwissen über ein bevorstehendes Ereignis aktiv. Diese Kontrolle basiert auf vorhersehbaren internen Modellen und ist in jeder posturalen Kontrollsituation aktiv. Die Motorsteuerung sendet eine efferente Kopie des Motorbefehls an das Feedforward-Modell. Dieses prognostiziert die Auswirkungen der geplanten Massnahmen und die erwarteten Veränderungen des Umfelds, woraus mögliche Folgen abgeschätzt werden können. Diese Abschätzung ermöglicht dem neuronalen System, im Vergleich zur Feedback-Kontrolle, schnellere und präzisere Motorbefehle zu erzeugen (Hooks, 2016). Die Feedforward-Kontrolle beinhaltet antizipatorische posturale Anpassungen (APA: anticipatory postural adjustment), welche bereits vor der Störung eine erhöhte Aktivität in den posturalen Muskeln hervorrufen. Die APAs sind für die Vorbereitung und Optimierung der posturalen Kontrolle bei zeitlich vorhersehbaren selbst-initiierten Störungen, bei selbst-initiierten extern ausgelösten Störungen sowie auch bei extern-initiierten Störungen mit zeitlich vorhersehbarem Start der Störung zuständig. Bei zeitlich unvorhergesehenen Störungen sind keine APAs erkennbar, da das System nicht in der Lage ist, das Feedforward-Modell zu verwenden (Wälchli, 2018).

Die Feedforward-Kontrolle ist jedoch nicht nur auf der Verhaltensebene mittels APAs zu beobachten, sondern auch durch die Erregbarkeit des ZNS. Diese Erregbarkeit kann angepasst werden, bevor ein Haltungsstimulus empfangen wird, ohne dass es zu APAs führt. Dieser neuromotorische Vorbereitungsstatus wird als Central-Set bezeichnet und kann durch die Veränderungen im anfänglichen Kontext modifiziert werden (Jacobs & Horak, 2007). Das Central-Set hängt vom antizipatorischen Charakter des Störungstyps ab, welcher das Wissen über die Art der Störung beinhaltet, die als nächstes auftreten wird oder nicht (Wälchli, 2018).

Der Kortex beeinflusst das Central-Set einerseits durch den Basalganglien-Kreislauf und andererseits durch den Kleinhirn-Kreislauf. Der Basalganglien-Kreislauf wird bei schnellen Anpassungen gefordert und basiert auf der Vorbereitung und Optimierung der Reaktion durch veränderte Bedingungen der Aufgabe und Umwelt (Jacobs & Horak, 2007). Der Kleinhirn-Kreislauf basiert auf der Erfahrung und beginnt im Hirnstamm, worin die posturalen Synergien organisiert werden. Posturale Synergien sind eine Gruppe von Muskeln, welche gleichzeitig aktiviert werden, um die posturale Kontrolle aufrecht zu halten. Die posturalen Synergien können in unterschiedliche Strategien, die Knöchelstrategie, die Hüftstrategie und Change-in-Support-

Strategie, eingeteilt werden (Huber, 2016). Die von dem Knöchel ausgestrahlte Reaktion wird Knöchelstrategie genannt, welche bei kleinen Störungen in ruhigem Stand reagiert, um die ausgelöste Körperschwankung zu kontrollieren. Bei stärkeren Störungen oder wenn die Muskeln um den Knöchel nicht agieren können, tritt eine Hüftstrategie ein, welche durch eine Flexion oder Extension der Hüfte den Körperschwerpunkt nach vorne oder nach hinten schiebt (Horak & Nashner, 1986). Bei der Change-in-Support-Strategie schnellen entweder die Arme nach oben oder die Person tätigt einen Schritt, um die Unterstützungsfläche zu vergrößern, damit die posturale Kontrolle wiederhergestellt werden kann (Jacobs & Horak, 2007). Die Synergien werden an die Anforderung der Umwelt und Aufgabe angepasst. Das Kleinhirn skaliert die Muskelkraft innerhalb der posturalen Synergien bei unterschiedlichen Stärken der Störung (Huber, 2016).

Wenn die Störung zeitlich vorhersehbar ist, besteht ein wachsendes Negativpotenzial über dem Kortex, ähnlich wie bei den Bereitschaftspotenzialen, die 1-2 Sekunden vor einer freiwilligen posturalen Bewegung auftreten. Bereitschaftspotenziale stellen kortikale Aktivitäten im Zusammenhang mit der Bewegungsplanung und –antizipation dar. Sie sind das zerebrale Korrelat für Reaktionsänderungen, die durch Veränderungen im Central-Set vermittelt werden (Jacobs & Horak, 2007).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass posturale Aktivitäten über Feedback- und Feedforward-Prozesse gesteuert werden. Die Feedback-Kontrolle, welche die CPAs beinhaltet, ist jedoch die einzige Möglichkeit das Gleichgewicht aufrecht zu erhalten, wenn eine zeitlich unvorhersehbare externe Störung eintritt. Bei extern-initiierten zeitlich unvorhersehbaren Störungen bleibt die Feedforward-Kontrolle aus. Sie tritt aber ein, wenn die Störung selbst oder direkt durch ihre eigene Bewegung initiiert wurde. Die Feedforward-Kontrolle, welche APAs beinhaltet, ist somit eine vorausschauende Haltungsanpassung, die vor der Störung ausgelöst wird. Es heisst jedoch nicht, dass wenn eine Feedforward-Kontrolle aktiv ist, die Feedback-Kontrolle ausbleibt (Hay & Redon, 1999).

#### **1.4 Posturale Reaktionen auf unterschiedliche Störungen**

Das ZNS muss sensorische Informationen aus einer Vielzahl von Quellen verarbeiten und integrieren, um präzise motorische Anpassungen zu erzeugen, damit die posturale Kontrolle hergestellt werden kann. Der Kortex spielt bei dieser Modifikation eine Rolle. Wenn die Körperhaltung verändert wird, wird auch die Strategie zur Wiederherstellung des posturalen Gleichgewichts verändert (Adkin, Quant, Maki & McIlroy, 2006). Die netzwerkartige Aktivität des ZNS, bestehend aus Rückenmark, Hirnstamm, Kleinhirn, Basalganglien und sensomotorischer

Kortex, verarbeitet afferente Informationen und generiert efferente Impulse. Diese anatomisch voneinander getrennten Anteile sind sehr eng miteinander verbunden (Huber, 2016). Die Abbildung 1 fasst die potenziellen neuronalen Schleifen der Haltungsreaktion zusammen.

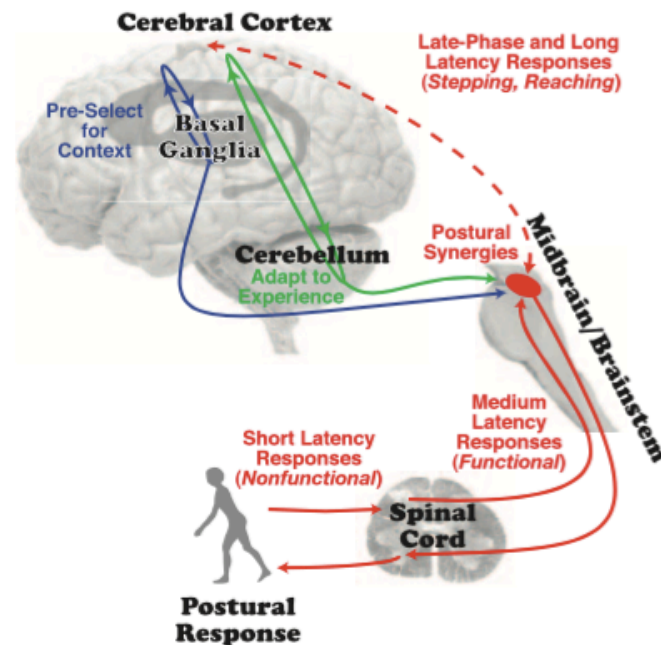


Abbildung 1. Ein einfaches Modell der potenziellen, involvierten neuronalen Schleifen in der kortikalen Kontrolle von kurzer, mittlerer und langer Latenzzeit automatischer posturalen Reaktionen auf posturale Störungen (Jacobs & Horak, 2007).

**1.4.1 Die Rolle der Präparation bei Reaktionen auf posturale Störungen.** Hay und Redon (1999) haben in ihrer Studie die Feedforward- mit der Feedback-Kontrolle bei Kindern und Erwachsenen bei posturalen Störungen untersucht. Die vorliegende Arbeit setzt sich im Gegensatz dazu nur mit den Resultaten der Erwachsenen auseinander. Die Untersuchung wurde mit selbst-initiierten und extern-initiierten Rückwärtsstörungen durchgeführt. Die Probanden standen barfuss auf einer Störungsplatte mit geschlossenen Augen und einer Last von 5% ihres Körpergewichts in der Hand. Die Oberarme waren vertikal und die Unterarme horizontal platziert. Bei der selbst-initiierten Störung (*self blocked*) mussten sie zum Auslösen der Störung die Last fallen lassen. Die extern-initiierte Störung (*unknown blocked*) wurde zufällig 2-5 Sekunden nach einem Signal ausgelöst (Hay & Redon, 1999).

Sie haben die maximale Verschiebung (Spitzenamplitude) des Druckmittelpunktes (COP: center of pressure) sowie die intraindividuelle Variabilität jedes Probanden bei den Störungen ausgewertet (Hay & Redon, 1999). Der COP beinhaltet die Körperschwankungen und die Kräfte,

um den Gravitationschwerpunkt und den Körperschwerpunkt innerhalb der Standfläche halten zu können. Er reflektiert die Orientierung der Körpersegmente durch die Gelenkwinkel und die Bewegung durch die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Gelenkwinkel (Prieto, Myklebust, Hoffmann, Lovett & Myklebust, 1996).

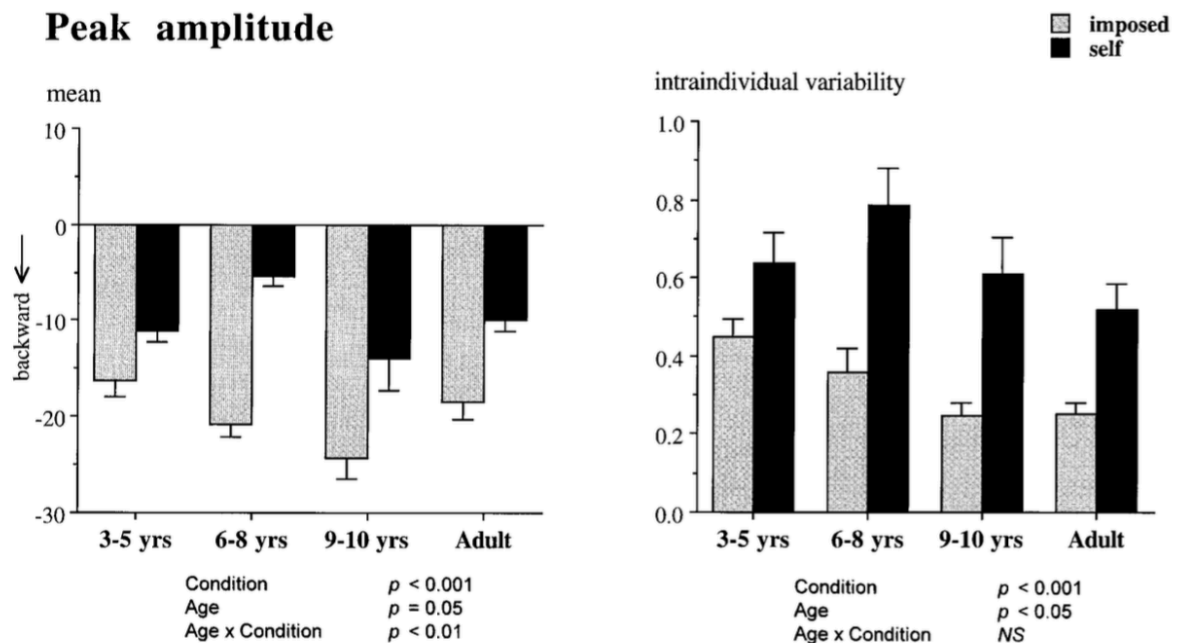


Abbildung 2. Spitzenamplitude der Rückwärtsverschiebung des Druckmittelpunktes (COP: center of pressure) angegeben in den Alterskategorien nach *self blocked* (schwarz) oder *unknown blocked* (grau) Störungen. Die linke Abbildung zeigt die Mittelwerte mit der Standardabweichung und die rechte Abbildung die intraindividuelle Variabilität mit der Standardabweichung (Hay & Redon, 1999).

Allgemein waren die posturalen Störungen bei *self blocked* kleiner im Vergleich zu *unknown blocked* (siehe Abbildung 2). Die Autoren begründen diese Tatsache damit, dass wenn die Probanden die Störung selbst auslösen konnten, sich die Feedforward-Kontrolle aktivierte, die das Ungleichgewicht verringerte. Wenn die Störung extern ausgelöst wurde, trat ein Feedback-Modus zur Auslösung der posturalen Reaktion erst in einer späteren Phase ein, was dazu führte, dass die Amplitude der posturalen Störung effektiver war (Hay & Redon, 1999).

Die intraindividuelle Variabilität der Störungen war bei *self blocked* im Vergleich zu *unknown blocked* grösser. Dies ist nicht verwunderlich, da bei der Reaktion auf selbst-initiierte Störungen das Feedforward- in das Feedback-Kontrollsystem integriert werden musste. Dadurch wurden im Vergleich zu einer reinen Feedback-Kontrolle die Freiheitsgrade des Kontrollsystems erhöht. Die Präparation *self*, welche unter anderem die zeitliche Vorhersehbarkeit des Starts der Störung beinhaltet, ging mit einer kleineren posturalen Reaktion auf posturale Störungen einher. Bei *self blocked* war die Feedforward-Kontrolle vor der Störung aktiv, welche die posturale

Reaktion verringerte. Die Präparation beeinflusst somit das agierende Kontrollsystem (Hay & Redon, 1999).

Die Feedforward-Kontrolle beinhaltet APAs, welche vor einer Störung aktiv sind. Die Rolle der Präparation zur Generierung von APAs wurde von Aruin und Latash (1995) in ihrer Studie mit selbst-initiierten und extern-initiierten Störungen untersucht, worin auch auf die Rolle der Motorik zur Generierung von APAs eingegangen wurde (Aruin & Latash, 1995).

Die Probanden absolvierten in dieser Studie vier Serien an jeweils sechs Rückwärtsstörungen. Bei der ersten Serie hielten die Probanden eine Last von 2.2 kg in der Hand, welche zur Auslösung der Störung diente. Nach einem computergesteuerten Tonsignal mussten die Probanden innerhalb der nächsten drei Sekunden eine bilaterale Schulterabduktion tätigen, wobei die Last losgelassen wurde (*self blocked 1*). In der zweiten Serie hielten die Probanden zwischen den Händen einen Ballon mit der unten angebundene Last, welche sie beim Tonsignal, wie in Serie 1, loslassen mussten (*self blocked 2*). Bei der dritten Serie war das Setting gleich wie bei der zweiten Serie, nur mussten hier die Probanden innerhalb von drei Sekunden nach dem Tonsignal den Ballon mit einem Reissnagel, welcher an ihrem Mittelfinger befestigt wurde, platzen lassen (*self blocked 3*). Die vierte Serie bestand aus einer Reihe zeitlich unvorhersehbaren Störungen, welche durch das Platzen des Ballons innerhalb von drei Sekunden nach dem Tonsignal durch den Experimentator ausgelöst wurde (*unknown blocked*). In dieser Serie hatten die Probanden die Augen geschlossen. Zudem wurden zusätzlich zwei Pilotserien mit zwei Probanden durchgeführt. In der ersten Pilotserie hatte der Proband keine Last in der Hand und musste zur Auslösung der Störung nur eine Schulterabduktion tätigen (*self blocked 4*). Die zweite Pilotserie verlief unter den gleichen Bedingungen wie in Serie 4, nur hatte der Proband die Augen geöffnet (*known blocked*) (Aruin & Latash, 1995).

Ausgewertet wurde die horizontale COP-Verschiebung, die antizipierende Muskelaktivität (m. rectus abdominis, m. erector spinae, m. rectus femoris, m. biceps femoris, m. soleus, m. tibialis anterior) bei 100 ms vor bis 50 ms nach der Störung ( $\int_1$ ) sowie die Hintergrundaktivität bei 500 – 350 ms vor der Störung ( $\int_2$ ). Die Muskelaktivität wird mittels Elektromyographie (EMG) erfasst, welche die Muskelfaseraktivität misst und mithilfe eines Elektromyogramms aufzeichnet. Die Muskelaktivität wurde durch das Verhältnis zwischen der antizipativen Muskelaktivität und der Hintergrundaktivität berechnet ( $(\int_1 - \int_2) / \int_2$ ) (Aruin & Latash, 1995).

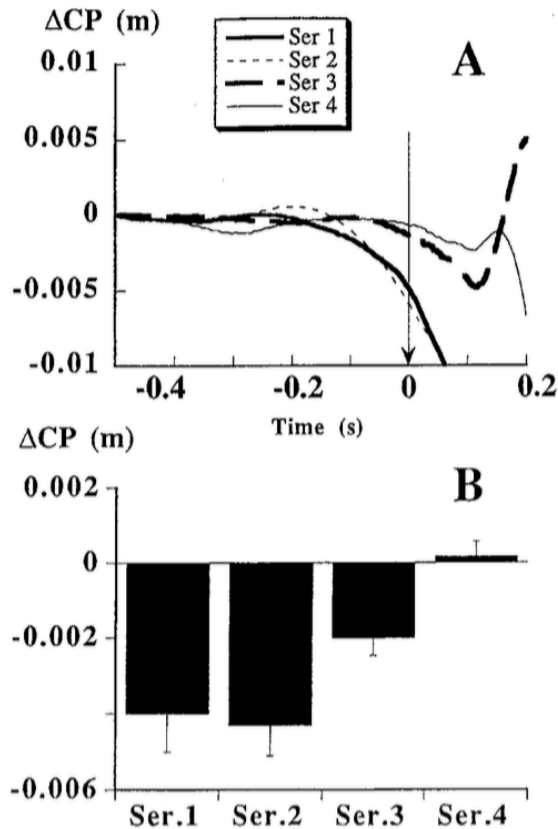


Abbildung 3. (A) Mittelwert der Verschiebung des Druckmittelpunktes (COP: center of pressure) in der anterior-posterior Richtung eines einzelnen Probanden in allen vier Serien. Aufgezeigt wird die antizipatorische Veränderung in den Serien 1-2 und das Ausbleiben in der Serie 4.

(B) Mittelwert und Standardabweichung der Verschiebung des Druckmittelpunktes (COP) aller Probanden 400 ms vor der Störung (Aruin & Latash, 1995).

Die COP-Verschiebung zeigte antizipatorische Komponenten in den ersten Serien *self blocked 1-3* (siehe Abbildung 3). Die Serie 1 und 2 unterschieden sich nicht signifikant, jedoch unterschieden sich beide von Null. Die Serie 3 wies eine kleinere COP-Verschiebung auf als die zwei vorherigen Serien, unterschied sich aber auch signifikant von Null. In der Serie 4, *unknown blocked*, wurde keine signifikante COP-Verschiebung von Null aufgezeigt. Die Serie 4 zeigte allgemein signifikant kleinere COP-Verschiebungen im Vergleich zu den Serien *self blocked 1-3* (Aruin & Latash, 1995).

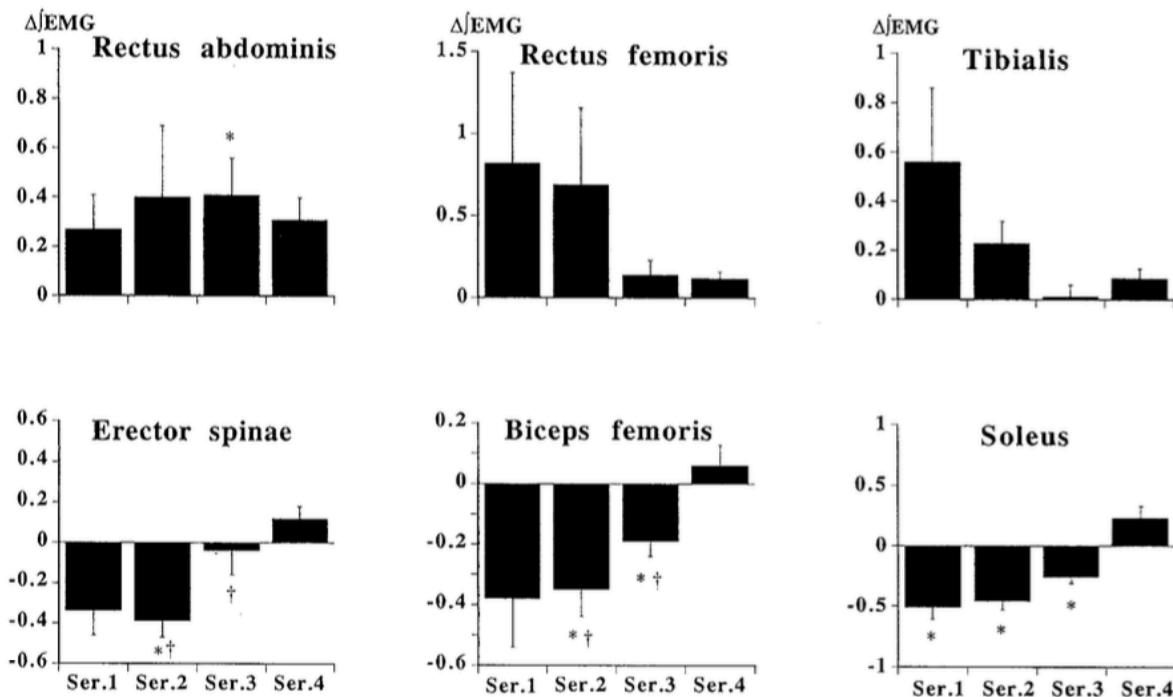


Abbildung 4. Mittelwert und Standardabweichung der relativen Veränderung der EMG-Aktivität aller Probanden in den Serien 1-4. \* Statistisch signifikanter Unterschied der Muskelaktivitätsveränderung im Vergleich zu Null ( $p < .05$ ); \*† Statistisch signifikanter Unterschied zwischen zwei Serien ( $p < .05$ ) (Aruin & Latash, 1995).

Antizipatorische Veränderungen in der posturalen Muskelaktivität konnten aufgezeigt werden (siehe Abbildung 4). Es konnten signifikante Erhöhungen der Muskelaktivität der Muskeln m. erector spinae in der zweiten Serie, m. biceps femoris in der zweiten und dritten Serie sowie m. soleus in den ersten drei Serien festgestellt werden. Es konnte keine Erhöhung in der vierten Serie gezeigt werden. Der Effekt der Muskelaktivität war bei den Muskeln m. erector spinae und m. biceps femoris in der zweiten Serie signifikant höher als in der dritten Serie. Die anderen Muskeln zeigten auch erhöhte Muskelaktivitäten auf, welche jedoch die Signifikanz verfehlten. Die Resultate zeigten, dass bei *self blocked 1-3*, unabhängig ob die Störung durch die Schulterabduktion oder durch das Platzen des Ballons ausgelöst wurde, APAs eintrafen, nicht jedoch bei *unknown blocked* und *known blocked*, wo die Störung extern durch den Experimentator ausgelöst wurde. Daraus, dass auch bei *known blocked*, wo durch die zusätzlichen geöffneten Augen der Start der Störung zeitlich vorhersehbar war, keine APAs generiert wurden, resultieren die Autoren, dass die Selbstinitiierung nicht nur aus der zeitlichen Vorhersehbarkeit besteht, sondern auch aus der motorischen Aktivität, welche direkt mit dem Aufgabenkontext verbunden ist, um die Störung auszulösen. Die Selbstinitiierung, bestehend aus der zeitlichen Vorhersehbarkeit und der motorischen Aktivität, ist ausreichend um APAs zu generieren. Die

funktionelle Rolle der APAs besteht aus einer geplanten Handlung, welche die Störungen auf die posturale Kontrolle und das Gleichgewicht abschwächt, was bedeutet, dass die APAs im Hinblick auf erwartete Auswirkungen einer Störung und nicht auf die Störung selbst skaliert werden. Es wurde gezeigt, dass bei der Präparation *self* APAs generiert werden und mit schwächeren EMG-Aktivitäten sowie auch kleineren COP-Verschiebungen nach der Störung einhergehen. Die Präparation beeinflusst die Generierung von APAs (Aruin & Latash, 1995).

Dieses Resultat unterstützen Santos, Kanekar und Aruin (2010a), welche mit unterschiedlichen Präparationen die Rolle der APAs in der kompensatorischen Haltungskontrolle (Feedback-Kontrolle) mittels EMG-Analyse untersuchten. Die Probanden standen barfuss auf einer Kraftmessplatte vor einem Pendel, welches an der Decke befestigt wurde. Das Pendel fungierte als Störung und war mit einem Handstab, welcher einen Schaumstoffüberzug hatte und 1.36 kg wog, versehen. Der Experimentator liess das Pendel immer von vorne los, welches durch die Probanden aufgefangen werden mussten. Die Untersuchung beinhaltete zwei Bedingungen. Bei der zeitlich vorhersehbaren Bedingung (*known blocked*) hatten die Probanden die Augen geöffnet und mussten den Handstab mit ausgestreckten Armen auffangen. Das gleiche mussten die Probanden bei der zeitlich unvorhersehbaren Bedingung (*unknown blocked*) machen, nur hatten sie dabei die Augen geschlossen (Santos et al., 2010a).

Bei der Untersuchung wurde die EMG-Aktivität der Muskeln m. gastrocnemius lateralis (GAS), m. tibialis anterior (TA), m. rectus femoris (RF), m. biceps femoris (BF), m. gluteus medius (GM), m. obliquus externus (EO), m. rectus abdominis (RA) und m. erector spinae (ES) sowie auch die COP-Verschiebung ausgewertet. Die Auswertung wurde in vier Zeitepochen unterteilt, nämlich in die APA1 (200 – 50 ms vor der Störung), APA2 (50 ms vor der Störung bis 100 ms nach der Störung), CPA1 (100 – 250 ms nach der Störung) und CPA2 (250 – 400 ms nach der Störung). Die CPAs dienen als Mechanismus, um den Körperschwerpunkt nach einer Störung wieder ins Gleichgewicht zu bringen (Santos et al., 2010a).

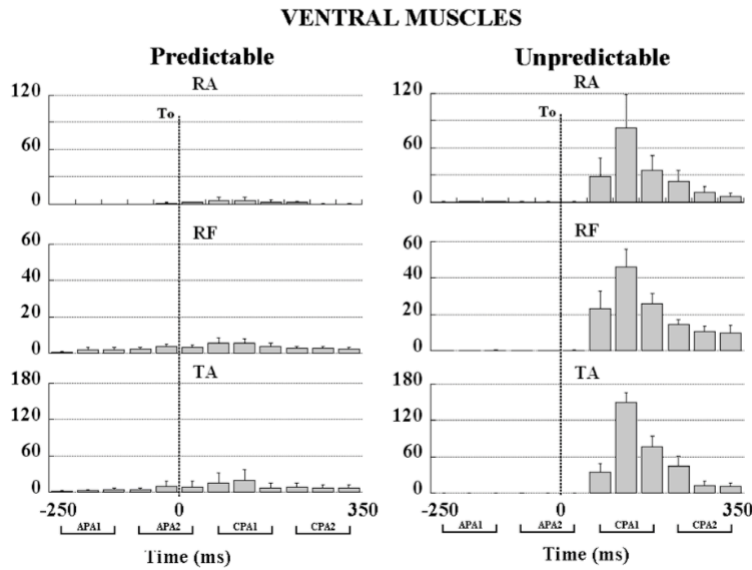


Abbildung 5. Mittelwert und Standardabweichung der EMG-Aktivität der ventralen Muskeln aller Probanden zwischen -200 und +400 ms während *known blocked* (links) und *unknown blocked* (rechts), eingeteilt in die Zeitintervalle APA1 (-200 – -50 ms), APA2 (-50 – 100 ms), CPA1 (100 – 250 ms) und CPA2 (250 – 400 ms).  $T_0$  beschreibt der Start der Störung (Santos et al., 2010a).

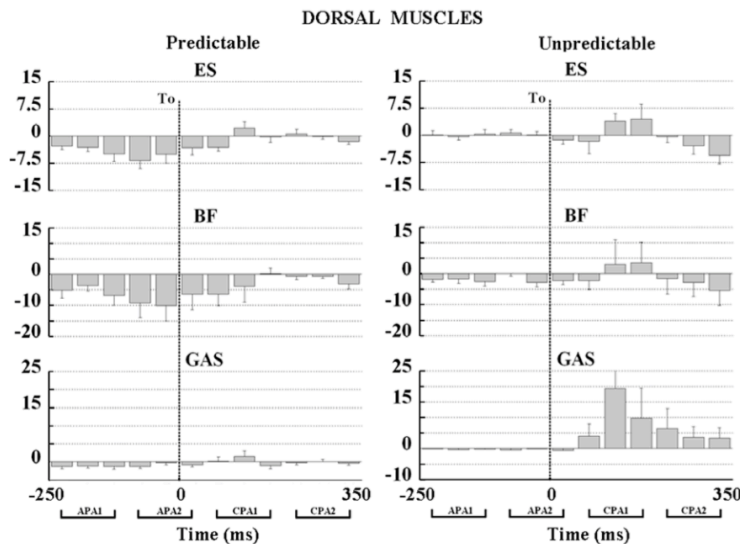


Abbildung 6. Mittelwert und Standardabweichung der EMG-Aktivität der dorsalen Muskeln aller Probanden zwischen -200 und +400 ms während *known blocked* (links) und *unknown blocked* (rechts), eingeteilt in die Zeitintervalle APA1 (-200 – -50 ms), APA2 (-50 – 100 ms), CPA1 (100 – 250 ms) und CPA2 (250 – 400 ms).  $T_0$  beschreibt der Start der Störung (Santos et al., 2010a).

Die Resultate der EMG-Aktivität zeigten vor der Störung eine reziproke Muskelaktivierung bei *known blocked*. Die ventralen Muskeln TA, RF und RA (siehe Abbildung 5) zeigten eine Erhöhung und die dorsalen Muskeln GAS, BF und ES (siehe Abbildung 6) eine Hemmung in der EMG-Aktivität. Bei *unknown blocked* waren keine APAs ersichtlich, jedoch eine grosse kompensatorische EMG-Aktivität nach der Störung. Die Reihenfolge der Muskelaktivierung war bei *unknown blocked* von proximal zu distal, bei *known blocked* von distal zu proximal. Die CPA-Phase war bei *unknown blocked* signifikant grösser als bei *known blocked* (Santos et al., 2010a).

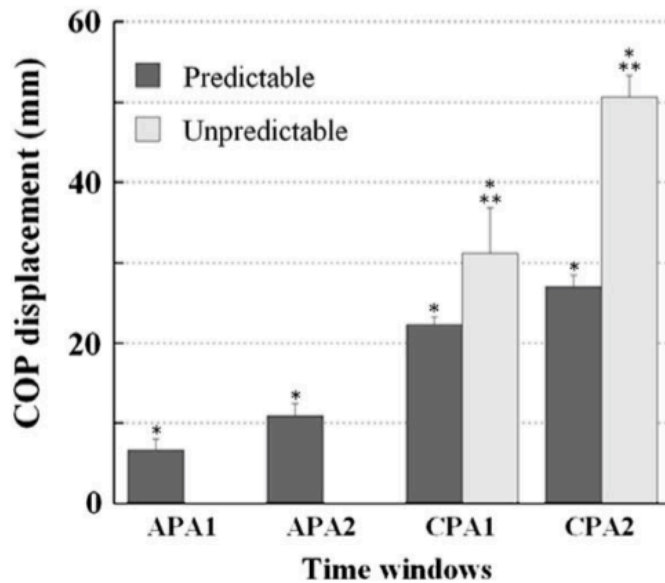


Abbildung 7. Rückwärtsverschiebung des Druckmittelpunktes (COP: center of pressure) für *known blocked* (dunkelgrau) und *unknown blocked* (hellgrau). \* beschreibt signifikante Unterschiede zwischen den Zeitepochen APA1 (-200 – -50 ms), APA2 (-50 – 100 ms), CPA1 (100 – 250 ms) und CPA2 (250 – 400 ms); \*\* beschreiben signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen *known blocked* und *unknown blocked* (Santos et al., 2010a)

Die COP-Verschiebung zeigten allgemein grössere Effekte bei *unknown blocked* im Vergleich zu *known blocked* (siehe Abbildung 7). Zu den Zeitpunkten APA1 und APA2 konnte bei *known blocked* eine COP-Verschiebung gemessen werden, welche bei *unknown blocked* nicht ersichtlich war. Bei *unknown blocked* konnte gezeigt werden, dass die COP-Verschiebungen bei APA1 und APA2 signifikant kleiner als in CPA1 und CPA2 waren, wobei CPA2 höher als CPA1 war. Die CPA-Phase war bei *known blocked* signifikant kleiner als bei *unknown blocked*. Es konnten unter *unknown blocked* grössere CPAs gesehen werden, da keine APAs verfügbar waren. Unter der Bedingung *known blocked* war der Zeitpunkt des Eintreffens der Störung zeitlich vorhersehbar, wodurch starke APAs generiert werden konnten, welche mit einer kleineren CPA-Phase einhergingen. Das ZNS bewertet die Beteiligung der APAs und erzeugt oder reduziert entsprechende CPAs, um den Körper zu stabilisieren.

Die Studie hat drei wichtige Erkenntnisse (Santos et al., 2010a):

1. Unter der Bedingung *known blocked* waren APAs zum Zeitpunkt APA1 und APA2 ersichtlich, welche jedoch in APA2 viel grösser waren. Das ZNS ist in der Lage, APAs nahe an dem Zeitfenster des Starts der Störung zu generieren.
2. Wenn keine APAs generiert wurden, wie bei *unknown blocked*, waren höhere EMG-Aktivitäten während der CPA1-Phase als in der CPA2-Phase ersichtlich. Die Störungen auf die posturale Kontrolle kann durch den Dehnungsreflex der Muskeln schnell verkleinert werden, worauf eine kleinere Muskelaktivität während CPA2 gebraucht wird, damit die posturale Kontrolle stabilisiert werden kann. Eine weitere Möglichkeit wäre,

dass in der CPA1-Phase zu grosse Kompensationen generiert werden, welche in der CPA2-Phase korrigiert werden müssen.

3. Während *known blocked* konnte eine reziproke Aktivierung der Muskulatur vor der Störung aufgezeigt werden. Die Muskelaktivität bei *unknown blocked* zeigte eine Ko-Aktivierung der Muskelpaare Agonist und Antagonist. Das ZNS ist in der Lage, mehrere Strategien umzusetzen, damit die Körperposition aufrecht gehalten werden kann.

Die Strategien des ZNS unterschieden sich auch in der Aktivierung der proximalen und distalen Muskulatur. Wenn das ZNS keine Informationen über die bevorstehende Störung hat, wie bei *unknown blocked*, verwendet es die proximale-distale-Strategie, bei welcher zuerst die Oberkörperposition hergestellt wird. Bei *known blocked* verwendet das ZNS die distal-proximal-Strategie, womit Kräfte auf den Boden ausgeübt werden, um der Störung entgegenzuwirken, wobei erst später die Oberkörperposition wiederhergestellt wird. Durch die Präparation *known* konnten APAs generiert werden, welche sich in einem distal-proximal-Muster der reziproken Muskelaktivierung äusserten und daher mit einer kleinen CPA-Phase einhergehen. Bei der Präparation *unknown* können keine APAs generiert werden und die unidirektionale Ko-Aktivierung ist zu unspezifisch, wodurch eine grosse CPA-Phase benötigt wird. Die Präparation beeinflusst das Muskelaktivierungsmuster der APAs, welches durch die zunehmende Spezifität mit kleineren benötigten CPAs einhergeht (Santos et al., 2010a).

Wie die haltungsbedingte Reaktion auf posturale Störungen mit diesen Erkenntnissen zusammenhängen, untersuchten die gleichen Autoren in einer zweiten Studie. Santos, Kanekar und Aruin (2010b) untersuchten die Rolle der APAs in der kompensatorischen Haltungskontrolle (Feedback-Kontrolle) bei *known blocked* und *unknown blocked*. Das Untersuchungsdesign in dieser Studie war mit der Studie von Santos et al. (2010a) identisch, jedoch wurden die Winkelveränderung der unteren (Fuss-, Knie-, Hüftgelenk) und der oberen Körpersegmente (Kopf, Brustkorb, Rücken) sowie auch die COP- und Körperschwerpunktverschiebung (COM: center of mass), eingeteilt in APA1, APA2, CPA1 und CPA2, ausgewertet. Die COM-Verschiebung wurde zusätzlich in die Sagittalebene (COM<sub>y</sub>) und Transversalebene (COM<sub>z</sub>) eingeteilt (Santos et al., 2010b).

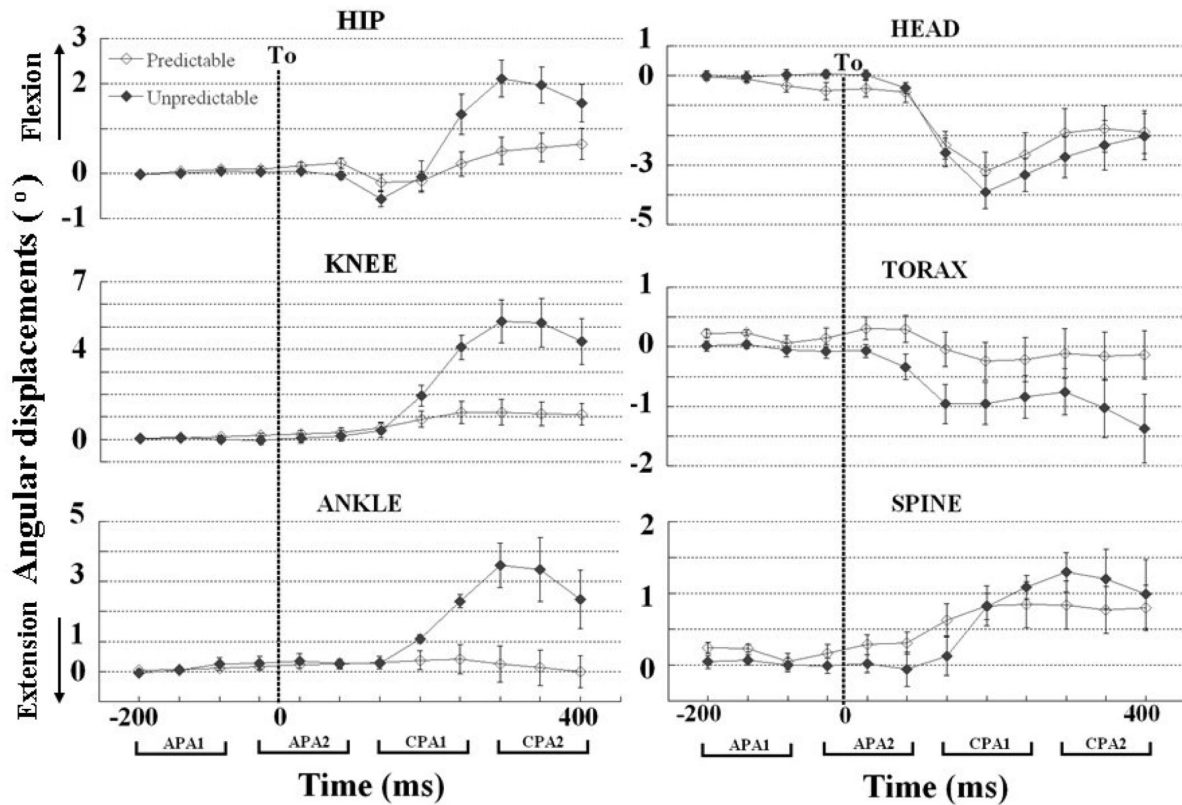


Abbildung 8. Mittelwert und Standardabweichung der Winkelveränderungen in Hüfte, Knie, Knöchel, Kopf, Brustkorb und Rücken aller Probanden zwischen -200 und +400 ms während *known blocked* (weiss) und *unknown blocked* (schwarz) Störungen, eingeteilt in die Zeitintervalle APA1 (-200 – -50 ms), APA2 (-50 – 100 ms), CPA1 (100 – 250 ms) und CPA2 (250 – 400 ms).  $T_0$  beschreibt der Start der Störung (Santos et al., 2010b).

Vor der Störung, während APA1 und APA2, zeigte sich keine Winkelveränderung im Knöchel, Knie und Hüfte bei *known blocked* und *unknown blocked* (siehe Abbildung 8). Bei *known blocked* wurden kleine Winkelveränderungen in den oberen Körpersegmenten (Kopf, Brustkorb, Rücken) ersichtlich, welche jedoch keine Signifikanz aufzeigten. Es wurde eine steigende Winkelveränderung in den unteren Körpersegmenten nach der Störung während CPA1 und CPA2 aufgezeigt, welche bei der *unknown blocked* stärker war, als bei *known blocked*. Für den Kopf, Brustkorb und Rücken wurden keine signifikanten Unterschiede der Winkelveränderungen zwischen *known blocked* und *unknown blocked* nach der Störung aufgezeigt (Santos et al., 2010b).

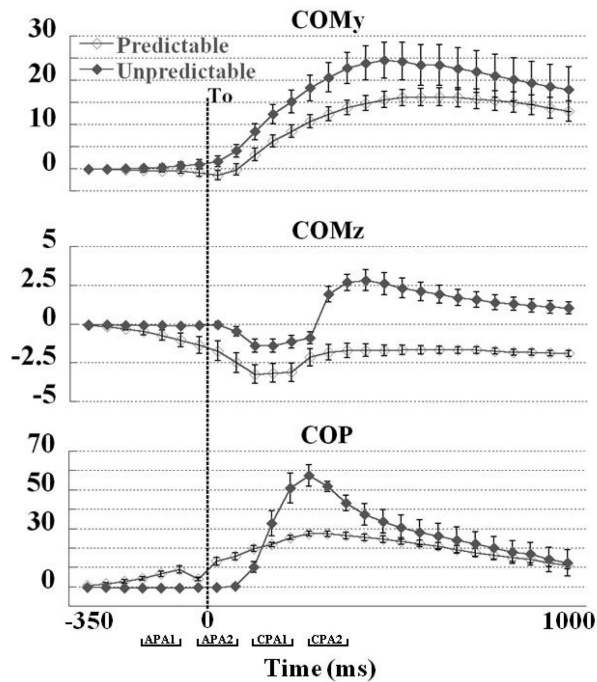


Abbildung 9. Mittelwert und Standardabweichung der Verschiebung des Körperschwerpunktes (COM: center of mass) in der Sagittalebene (COMy) und Transversalebene (COMz) sowie die Verschiebung des Druckmittelpunktes (COP: center of pressure) während *known blocked* (weiss) und *unknown blocked* (schwarz), eingeteilt in die Zeitintervalle APA1 (-200 – -50 ms), APA2 (-50 – 100 ms), CPA1 (100 – 250 ms) und CPA2 (250 – 400 ms).. To beschreibt der Start der Störung (Santos et al., 2010b).

Bei *known blocked* war die COP-Verschiebung die erste eintreffende Bewegung bei 306 ms vor dem Start der Störung, gefolgt von der COMz und COMy (siehe Abbildung 9). Bei *unknown blocked* war die erste Bewegung die COMy-Verschiebung bei 42 ms nach dem Start der Störung, gefolgt von COMz und COP. In der APA-Phase war bei *known blocked* eine kleine COMy- und COMz-Verschiebung ersichtlich. Zudem war vor dem Start der Störung auch eine klare Rückwärtsverschiebung des COP vorhanden, welche bei *unknown blocked* nicht eintraf. Bei *unknown blocked* wurde auch keine COMz-Verschiebung beobachtet, jedoch eine kleine COMy-Verschiebung vor dem Start der Störung. Nach der Störung konnten bei *known blocked* und *unknown blocked* COP-, COMy- und COMz-Verschiebungen beobachtet werden, welche bei *unknown blocked* grösser waren. Die maximalen Verschiebungen des COP, COMy und COMz während *known blocked* unterschieden sich hochsignifikant von der Bedingung *unknown blocked*, jedoch unterschied sich der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Verschiebung nicht (Santos et al., 2010b).

Spannend ist nun der Vergleich der Resultate von Santos et al. (2010a) mit der Winkelveränderung im Knöchel, Knie und Hüfte. Die Autoren zeigten in ihrer vorherigen Studie (Santos et al., 2010a) die distal-proximal Muskelaktivierung bei *known blocked* vor dem Start der Störung. Dieses Aktivierungsmuster geht nicht mit grösseren Winkelverschiebungen in den unteren Körpersegmenten einher, da sowohl bei *known blocked*, wie auch bei *unknown blocked* ähnliche Winkelveränderungen ersichtlich waren. Jedoch waren während *known blocked* APAs aktiv, welche mit einer kleineren Winkelverschiebung nach der Störung einhergehen. Bei *unknown*

*blocked* werden zuvor keine APAs generiert, jedoch sind höhere EMG-Aktivitäten mit einer proximal-distal-Muskelaktivierung nach der Störung ersichtlich, welche mit einer grösseren Winkelveränderung der unteren Körpergelenke (Knöchel, Knie, Hüfte) einhergehen. Da in der CPA-Phase die Winkelveränderungen der oberen Körpersegmente bei *known blocked* und *unknown blocked* kleiner und ähnlich waren, schlagen die Autoren vor, dass die Winkelveränderung der unteren Körpersegmente eine wichtige Rolle zur Minimierung der Oberkörperverschiebung spielen. Dadurch kann die vertikale Ausrichtung erhalten bleiben. Die Winkelverschiebung der unteren Körpersegmente ist für die unterschiedlichen COM- und COP-Verschiebungen bei *known blocked* und *unknown blocked* verantwortlich. Während *known blocked* wird die Strategie des ZNS verwendet, um die Körpersegmente, vor allem die Proximalen, optimaler auf die Störung vorzubereiten, wodurch nach der Störung kleinere Winkelveränderungen in den unteren Körpersegmenten gezeigt werden. Im Gegenteil dazu, um das Gleichgewicht bei *unknown blocked* wiederzuerlangen, braucht das ZNS Bewegungen in Knöchel, Knie und Hüfte. Die maximale COM- und COP-Verschiebung war bei *known blocked* und *unknown blocked* verschieden, jedoch war der Zeitpunkt der maximalen Verschiebung ähnlich. Bei *unknown blocked* verschob sich der COP vom Start der Verschiebung bis zur Spitzenverschiebung in einer kurzen Zeit, im Vergleich zu *known blocked*, wo dem COP mehr Zeit zur Verfügung stand, bis dieser die Spitzenverschiebung erreichen konnte. Das ZNS schätzt die «beste» Zeitspanne für den COP ein, um auf eine Störung zu reagieren und die Spitzenverschiebung zu erreichen. Bei *unknown blocked*, wo keine antizipatorischen Korrekturen erfolgten, wurden grosse kompensatorische Winkelveränderungen in Knöchel, Knie und Hüfte sowie grössere COM- und COP-Verschiebungen ersichtlich. Im Gegensatz dazu initiierten bei *known blocked* APAs eine COP-Verschiebung, um die oberen Körpersegmente vor der Störung in einer besseren Position anzuordnen, was mit einer kleineren kompensatorischen COP- und COM-Verschiebung und kleineren Winkelveränderungen in den unteren Körpersegmenten einhergeht. Die Präparation beeinflusst die durch die APAs generierte optimale Positionierung der oberen Körpersegmente, wodurch eine kleine CPAs in den unteren Körpersegmenten erforderlich sind, um die posturale Kontrolle wiederzuerlangen (Santos et al., 2010b).

Nashner (1982) erklärte, dass die Muskelreaktion auf eine *known blocked* und *self blocked* Störung in einer bottom-up Reihenfolge aktiviert wird, wobei als erstes die distalen Muskeln und als zweites die proximalen Muskeln aktiv werden. Dieser Hinweis deutet darauf hin, dass das ZNS zuerst die Muskeln des Gelenks, das der Störung am naheliegendsten ist, aktiviert, um das Gelenk zu stabilisieren. Erst in einem späteren Zeitpunkt werden die Muskeln zur Stabilisierung des Kniegelenks und des Hüftgelenks aktiviert (Nashner, 1982). Mit diesem Befund gehen

Freyler, Gollhofer, Colin, Brüderlin und Ritzmann (2015) einher. Sie erklärten, dass die distale Muskulatur als treibende Kraft agiert, während die proximale Muskulatur später als Stabilisator einsetzt. Zudem untersuchten sie den Zusammenhang von Störungsgeschwindigkeit und Verschiebungsdistanz der Störungsplattform bei *unknown random*. Das Ergebnis zeigte, dass bei zunehmender Störungsgeschwindigkeit die Wichtigkeit der distalen Muskulatur zunahm, da sie zur Isolierung der distalen Gelenkmomente führte, um das Gleichgewicht wiederherzustellen. Wenn die Verschiebungsdistanz vergrößert wurde, so aktivierten sich die distale und später auch die proximale Muskulatur, um die posturale Kontrolle wiederzuerlangen. Eine Vergrößerung der Verschiebungsdistanz verursachte eine zunehmende Kinematik der proximalen Segmente, welche sich in einer grösseren COP-Verschiebung und Hüftgelenks-Verschiebungen äusserte (Freyler et al., 2015).

Die Rolle der Präparation ist zusammenfassend essentiell, damit sich das ZNS auf die Störung vorbereiten kann. Je zeitlich vorhersehbarer der Start der Störung ist, desto spezifischere APAs können vor der Störung generiert werden, desto kleiner sind die CPAs nach der Störung. Ist der Start der Störung zeitlich unvorhersehbar, so werden keine APAs aktiviert und die CPAs sind für die Wiederherstellung der posturalen Kontrolle erforderlich.

**1.4.2 Die Rolle der Reihenfolge bei der Reaktion auf posturale Störungen.** Piscitelli, Falaki, Solnik und Latash (2017) untersuchten in ihrer Studie die Rolle der Reihenfolge bei selbst-initiierten Störungen und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Feedforward-Kontrolle, welche die Generierung von APAs beinhaltet. Die Hypothese, dass APAs empfindlich auf Informationen über die Störungsrichtung reagieren würden, wurde in zwei Teilhypothesen unterteilt. Bei nicht-antizipierter Störungsrichtung im Vergleich zu antizipierter Störungsrichtung (1) können APAs verzögert werden oder sogar ausbleiben. (2) APAs können ihre Verhaltensmuster ändern. Sie erwarteten eine reziproke Aktivierung der Agonist-Antagonist-Haltungsmuskelpaaren bei Störungen mit antizipierter Störungsrichtung und Ko-Kontraktionen bei Störungen mit nicht- antizipierter Störungsrichtung (Piscitelli et al., 2017).

Die Probanden standen auf einer Störungsplatte und fixierten einen Punkt. Sie führten 4 Serien an jeweils 24 Störungen durch. Jede Serie bestand aus einer anderen Störungsbedingung, welche entweder vorwärts antizipiert (FKn: *forward self blocked*) oder nicht- antizipiert (FUn: *forward self random*) sowie rückwärts antizipiert (BKn: *backward self blocked*) oder nicht-antizipiert (BUn: *backward self random*) war. Jede Störung wurde selbst initiiert, indem die Probanden einen Knopf betätigten, wobei unmittelbar die Störung ausgelöst wurde. Es wurden EMGs für die dorsalen Muskeln (m. soleus, m. gastrocnemius lateralis, m. gastrocnemius medialis, m.

biceps femoris, m. semitendinosus, m. erector spinae lumbalis, m. erector spinae thoracalis) und für die ventralen Muskeln (m. tibialis anterior, m. vastus medialis, m. vastus lateralis, m. rectus femoris, m. rectus abdominis, m. tensor fasciae latae) erfasst und in zwei unterschiedlichen Muskelmodi, C-Index (Muskel-Ko-Kontraktion) und R-Index (reziproke Muskelaktivierung), ausgewertet (Piscitelli et al., 2017).

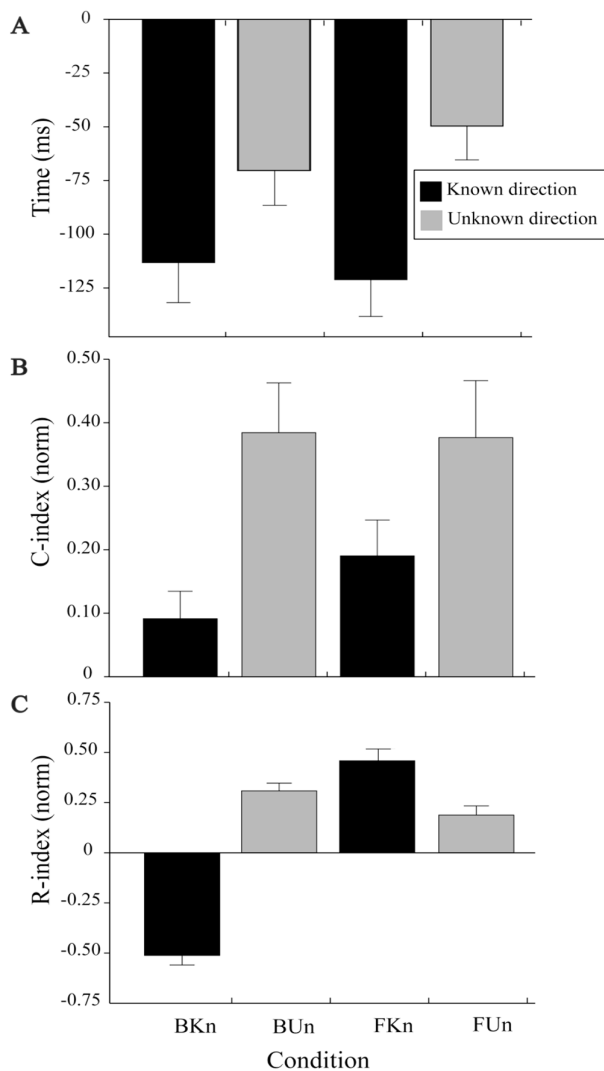


Abbildung 10. Mittelwert und Standardabweichung der antizipatorischen posturalen Anpassungen (APA: anticipatory postural adjustment) bei der Störungsrichtung *blocked* (schwarz) und *random* (grau). Abbildung A zeigt das APA-Timing, Abbildung B der C-Index (Muskel-Ko-Kontraktion) und Abbildung C der R-Index (reziproke Muskelaktivierung). Signifikante Unterschiede wurden bei der Verzögerung (A) und der Reorganisation (B, C) der antizipatorischen posturalen Anpassungen (APA) bei *self random* Störung (BUn, FUn) gezeigt (Piscitelli et al., 2017).

Die Resultate zeigten eine signifikante Änderung der unterschiedlichen Muskelaktivität vor jeder *self blocked* Störung (siehe Abbildung 10). Unter den *self blocked* Bedingungen, wurde eine reziproke Änderung der Muskelaktivierung zwischen Agonist und Antagonist festgestellt. Bei *backward self blocked* wurde ein Abfall (negativer R-Index) des Aktivierungsniveaus der dorsalen Muskeln und bei den *forward self blocked* ein Anstieg (positiver R-Index) der ventralen Muskelaktivität ersichtlich. Bei *self random* zeigte sich eine unidirektionale Änderung zwischen Agonist und Antagonist, was bedeutet, dass eine erhöhte Aktivierung der dorsalen und

ventralen Muskeln ersichtlich war. Zudem war der R-Index bei *forward self random* und *backward self random* positiv und kleiner. Die Störungsrichtung hatte nur einen signifikanten R-Index bei den *self blocked* Bedingungen. Der C-Index stieg vor der Störung bei *forward self random* und *backward self random* viel stärker an (Piscitelli et al., 2017).

Beide Teilhypothesen konnten bestätigt werden. Die APAs blieben vor den *self random* Störungen aus. Es wurden reziproke APA-Verhaltensmuster bei *self blocked* beobachtet, während bei *self random* die APAs zu einer Ko-Kontraktion wechselten, da die Störungsrichtung nicht-antizipiert war. Dieser Wechsel kann als Sicherheitsüberlegung angesehen werden. Zudem besagen die Autoren, dass APAs auch einen funktionalen Sinn ergeben, wenn die Störungsrichtung antizipiert ist, um mit der angemessenen Strategie auf die erwartete Störungsauswirkung zu reagieren. Bei antizipierten Störungsrichtungen treten vor der Störung APAs auf, die zu einer Reaktionsmodifikation durch die kortikale Aktivität führen. Im Gegensatz dazu werden bei nicht-antizipierten Störungsrichtungen APAs erzeugt, welche für grössere Belastungen geeignet sind oder versuchen, die Belastungen von unmittelbar vorherigen Störungen zu skalieren. Die Reihenfolge beeinflusst die Generierung der APAs in Bezug auf die Spezifität der Muskelaktivierung. Bei *self blocked*, wo die Störungsrichtung nicht spekuliert oder erraten werden muss, treten APAs in Form einer reziproken Muskelaktivierung vor der Störung auf, welche bei *self random* durch eine unidirektionale Ko-Kontraktion ersichtlich wird (Piscitelli et al., 2017).

Die Reihenfolge hat Auswirkungen auf die vorherige Absicht, mit einer bestimmten Strategie auf eine posturale Störung zu reagieren, welche sich auch in den haltungsbedingten Reaktionen widerspiegelt. Horak und Nashner (1986) haben die Muskelaktivität und die damit verbundenen haltungsbedingten Strategien auf posturale Störungen untersucht. Dabei waren die Probanden 20 Vorwärtsstörungen und 20 Rückwärtsstörungen mittels einer Störungsplattform ausgesetzt, welche zu einem unvorhersehbaren Zeitpunkt extern ausgelöst wurden (*unknown blocked*). Die Probanden glichen dabei jeweils 10 Störungen in der gleichen Richtung nacheinander aus, worauf die Störungsrichtung gewechselt wurde. Es wurden die Winkelverschiebungen in Knöchel, Knie und Hüfte sowie auch die Muskelaktivität der Muskeln m. gastrocnemius medialis (G), m. tibialis anterior (T), m. biceps femoris (H), m. rectus femoris (Q), m. erector spinae (P) und m. rectus abdominis (A) nach der Störung ausgewertet (Horak & Nashner, 1986).

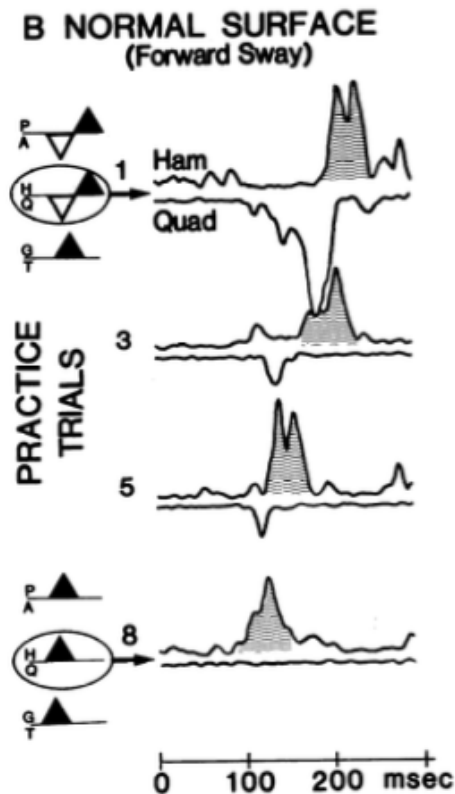


Abbildung 11. Anpassung der Muskelaktivierungsmuster nach mehreren Versuchen. Verschiebung von komplexen Hüft-Knöchelstrategien in den frühen Versuchen 1, 3, 5 zu einer puren Knöchelstrategie ab dem Versuch 8 bei Rückwärtsstörungen (Horak & Nashner, 1986).

Die Resultate zeigten, dass zu Beginn einer *unknown blocked* Störung die proximalen Muskeln aktiviert wurden und erst später die distalen Muskeln (siehe Abbildung 11). Nach mehreren ausgeglichenen Störungen in der gleichen Richtung, zeigte sich ein Aktivierungsmuster, welches in den Muskeln beim Fussgelenk in der zur Störung entgegengesetzter Richtung begann und weiter in distaler bis proximaler Folge auf die Oberschenkel- und Rumpfmuskulatur ausstrahlte. Die genaue Anzahl der Störungen, welche ausgeglichen wurden, bis sich ein Aktivierungsmuster aufzeigte, war sehr variabel. Es zeigte sich also eine Verschiebung der Strategie durch die Erfahrung, welche subjektabhängig ist. Das posturale Kontrollsystem stellt komplexe Bewegungsabläufe durch die Kombination beider Strategien her und aktiviert dafür eine begrenzte Teilmenge an Muskeln in Knöchel, Knie und Hüfte. Die komplexen Bewegungsstrategien, die bei der Anpassung an neue Bedingungen verwendet werden, sind Kombinationen der reinen Knöchel- und Hüftstrategie. Die Strategie wird bereits vor der Störung zurechtgelegt. Durch die Erfahrung kann eine Modifikation der Strategie vorgenommen werden. Diese Veränderung ist nicht augenblicklich, sondern erfolgt progressiv. Die Reihenfolge beeinflusst somit die Strategie, womit auf die posturale Störung reagiert wird und kann durch die Erfahrung modifiziert werden (Horak & Nashner, 1986).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Reihenfolge die Generierung der APAs in Bezug auf die Spezifität des Muskelaktivierungsmusters und der damit verbundenen Strategie zur Reaktion auf posturale Störungen beeinflusst, welche durch die Erfahrung angepasst werden kann.

Das ZNS legt sich vor der Störung eine Reaktionsstrategie bereit, welche durch die vorhandenen Störungseigenschaften auf die erwartete Störung abgestimmt ist. Die Absicht mit einer bestimmten Strategie auf eine Störung zu reagieren, ermöglicht Modifikationen der gesamten Reaktion. Diese Modifikationen sind kortikal vermittelt (Jacobs & Horak, 2007).

Adkin et al. (2006) untersuchten in ihre Studie die Modifikation, welche durch die kortikale Aktivität beeinflusst wird, mit den zusammenhängenden posturalen Reaktionen auf unterschiedliche posturale Störungen. Die Testpersonen waren bei der Untersuchung drei Bedingungen ausgesetzt, nämlich einer zeitlich vorhersehbaren und einer zeitlich unvorhersehbaren Störung sowie einer Überraschungsstörung. Die zeitlich vorhersehbare Bedingung bestand aus 30 extern-initiierten Störungen, wobei der Start der Störung und die Störungsrichtung (vorwärts) immer bekannt waren (*known blocked*). Die zeitlich unvorhersehbare Bedingung bestand aus 30 extern-initiierten Störungen, wobei die Störungsrichtung (links, rechts, vorwärts, rückwärts) und der Start der Störung nie bekannt war (*unknown random*). Die Überraschungsstörung, welche zeitlich unvorhersehbar im Start der Störung und immer vorwärts war, trat einmalig nach der Serie *known blocked* auf (*surprise*). Die Probanden hatten die Augen während der Durchführung geschlossen. Sie untersuchten die kortikale Aktivität der P1-Reaktion und der N1-Reaktion. Die P1-Reaktion ist ein instabiles kleines positives Potenzial und die früheste unspezifische kortikale Antwort auf eine Störung. Die N1-Reaktion tritt ca. 100 – 200 ms nach der Störung auf und ist ein grosses stabiles, negatives Potenzial. Sie ist die Verarbeitung der posturalen Störung auf der Ebene des Kortex und kann durch unterschiedliche Komponenten (Alter, die Standbreite, Störungsamplitude, einem gleichzeitigen peripheren Stimulus, Dualtask) modifiziert werden. Zudem wurde die COP-Verschiebung und die EMG-Aktivität des m. gastrocnemius medialis erfasst (Adkin et al., 2006).

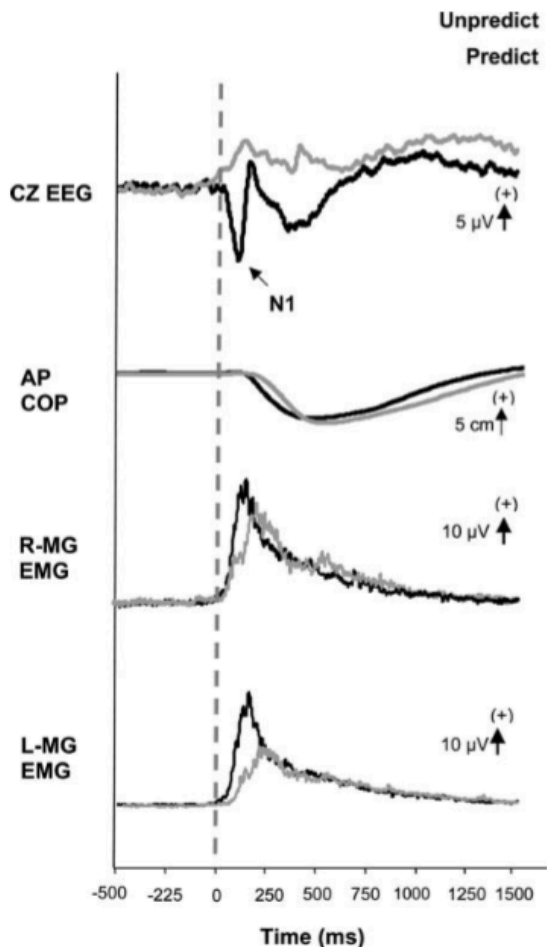


Abbildung 12. Durchschnitt der kortikalen Aktivität (CZ), anterior-posterior Druckmittelpunktverschiebung (AP COP), EMG des linken (L) und rechten (R) m. gastrocnemius medialis (MG) bei *known blocked* (graue Linie) und *unknown random* (schwarze Linie) Störungen. Der vertikale grau-gestrichelte Strich zeigt den Start der Störung (Adkin et al. 2006).

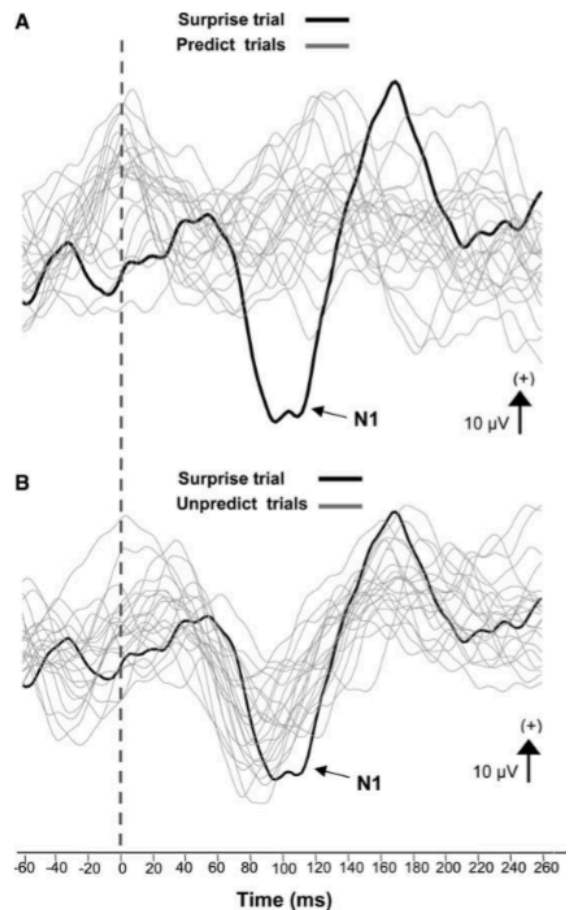


Abbildung 13. Kortikale Aktivität (CZ) aller Versuche eines Probanden während *known blocked* (Abbildung A, graue Linien) und *unknown random* (Abbildung B, graue Linien) sowie die kortikale Aktivität bei *surprise* (Abbildung A und B, schwarze Linie). Der vertikale grau-gestrichelte Strich zeigt den Start der Störung (Adkin et al. 2006).

Die Resultate der kortikalen Aktivität zeigten, dass bei *unknown random* eine N1-Reaktion ersichtlich war (siehe Abbildung 12). Dieses negative Potenzial trat bei *known blocked* nicht auf. Es war zwar eine grössere Veränderung sichtbar, jedoch ohne N1-Reaktion. Ähnliche Resultate konnten für die Überraschungsstörungen gezeigt werden (siehe Abbildung 13). Die N1-Reaktion war bei *surprise* und *unknown random* ähnlich, jedoch bei *surprise* ein bisschen grösser. Weiter wurde nur bei drei von acht Probanden eine P1-Reaktion aufgezeigt, welche jedoch bei beiden Bedingungen (*known blocked* und *unknown random*) ähnlich waren. Dies deutet darauf hin, dass bei beiden Bedingungen eine ähnliche primär-sensorische Repräsentation der posturalen Störung vorliegt (Adkin et al., 2006).

Die COP-Verschiebung vor und nach der Störung hat signifikante Unterschiede zwischen der *known blocked* und *unknown random* ergeben. Bei *known blocked* konnte vor der Störung eine kleine Rückwärtsverschiebung des COP von 4mm beobachtet werden, welcher mit einer Verzögerung des Spitzenwertes des COP nach der Störung von 75 ms im Vergleich zu *unknown random* einhergeht. Das EMG hingegen hat keine signifikanten Unterschiede zwischen *known blocked* und *unknown random* vor der Störung ergeben. Jedoch spiegelte die signifikante und schnelle Reaktion unter *known blocked* die Verarbeitung des durch die Störung entstandenen afferenten Signals nach der Störung wieder. Trotz eines potenziellen Unterschiedes im Zustand vor der Störung konnte gezeigt werden, dass ein sensorischer Input bestand, welcher ausreichend war, um die Reaktion in beiden Bedingungen mit grosser Amplitude zu steuern (Adkin et al., 2006).

Sie begründeten ihre Resultate dadurch, dass sich das ZNS bei *known blocked* auf die Störung vorbereitet und diese erwartet. Die vorherigen Kenntnisse über die Störung kann die Rolle des Kortex bei der posturalen Kontrolle verändern. Wenn die Störungsmerkmale bekannt sind, kann die Verarbeitung auf der Ebene des Kortex als «unnötig» erachtet werden, da das System auf die Reaktion vorbereitet ist. Die tatsächlich eintreffenden Störungseigenschaften stimmen mit den erwarteten Störungseigenschaften überein. Bei *surprise* und *unknown random* bestehen Unterschiede in den erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften der Störung. Falls also das System anders eingestellt war, müsste es über diese Unterschiede informiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass die kortikale Aktivität bei *surprise* und *unknown random* in den frühen Phasen der Reaktion ein kortikales Fehlersignal der sensomotorischen Verarbeitung anzeigte, welches im Zusammenhang mit dem Störungsreiz war und nur bei *unknown random* und *surprise* eintraf (Adkin et al., 2006).

Jacobs und Horak (2007) unterstützen dieses Resultat. Gleichzeitig erfordert die Reaktion auf zeitlich unvorhersehbare Störungen eine On-line-Reaktionsmodifikation, welche subjektabhängig ist. Die On-line-Reaktionsmodifikation ist notwendig, wenn die Erwartung über eine Störung nicht mit der tatsächlichen Störung übereinstimmt. Sie beeinflusst nur die späte Phase der posturalen Reaktion (Jacobs & Horak, 2007).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das ZNS normalerweise die "beste Schätzung" über eine zeitlich vorhersehbare posturale Störung macht und eine kontextuell angemessene und erfahrungsgemässe posturale Reaktion einleitet, bevor die Reaktion überhaupt ausgelöst wird. Tritt dann eine Störung auf, wobei die Reaktion zunächst nicht ausreichend ist, um die posturale Kontrolle wiederherzustellen, so wird der Kortex in den Spätphasen der posturalen Reaktion

rekrutiert, um zusätzlich freiwilligere Haltungseinstellungen vorzunehmen (Jacobs & Horak, 2007). Das Feedforward-System ist ein Energiesparprinzip des Körpers (Hay & Redon, 1999).

### 1.5 Ziel der Arbeit

Wie bereits beschrieben, ist das Wissen über eine auftretende posturale Störung essentiell, damit angemessen darauf reagiert werden kann (Wälchli, 2018). Es konnte gezeigt werden, dass die Präparation die posturale Kontrollstrategie beeinflusst. Bei den Präparationen *self* und *known* tritt die Feedforward-Kontrolle ein, was bedeutet, dass APAs generiert werden können, welche die Feedback-Reaktion auf posturale Störungen abschwächen. Dieses Erkenntnis wurde durch eine tiefere EMG-Aktivität und kleine COP-Verschiebungen ersichtlich (Aruin & Latash, 1995; Hay & Redon, 1999). Bei *unknown* können keine APAs generiert werden, da der Start der Störung zeitlich unvorhersehbar ist, woraus eine grössere posturale Reaktion nach der Störung resultiert (Aruin & Latash, 1995). Die Generierung von APAs ist zudem von der Selbstinitiiierung, welche aus der zeitlichen Vorhersehbarkeit und der motorischen Aktivität zur Initiierung der Störung besteht (Aruin & Latash, 1995), sowie von der Reihenfolge abhängig. Bei zusätzlicher antizipierter Reihenfolge bei den Bedingungen *self blocked* und *known blocked*, ist ein distal-proximal Muster der reziproken Muskelaktivierung vor der Störung ersichtlich. Bei der Reihenfolge *random*, unabhängig von der Präparation, sind keine APAs ersichtlich, sondern eine unidirektionale Ko-Kontraktion der dorsalen und ventralen Muskeln, was dazu führt, dass eine stärkere Feedback-Kontrolle einsetzen muss, damit die posturale Kontrolle wiederhergestellt werden kann (Piscitelli et al., 2017; Santos et al., 2010a). Die Reihenfolge beeinflusst auch die Strategie des ZNS, womit auf die posturalen Störungen reagiert wird (Horak & Nashner, 1986). Bei den Präparationen *self* und *known* mit antizipierter Reihenfolge (*blocked*) kann sich das ZNS auf die Störung vorbereiten und sie erwarten, wodurch keine sensorische Verarbeitung am Kortex stattfinden muss. Die Reaktion kann bereits vor der Störung zurechtgelegt werden. Die erwartete Störung wird mit der tatsächlich eintreffenden Störung übereinstimmen. Bei nicht-antizipierter Reihenfolge (*random*) bedarf das ZNS einer On-line-Reaktionsmodifikation nach der Störung. Bei *unknown random* kann sich das System weder auf die Störungsrichtung, noch auf den Start der Störung vorbereiten, wobei ein Fehlersignal entstehen kann, da die erwartete Störung nicht mit der tatsächlichen Störung übereinstimmen kann, da die Störungseigenschaften unbekannt sind (Adkin et al., 2006; Horak & Nashner, 1986; Jacobs & Horak, 2007).

Bisher wurde die Rolle der Präparation und Reihenfolge bei *known random* und *unknown blocked* noch nicht ausgiebig erforscht und diskutiert. Zudem existiert noch keine Studie, welche

einen direkten Vergleich der Reaktionen zwischen den unterschiedlichen posturalen Störungen mit den gleichen Probanden aufzeigt. Durch die vorliegende Arbeit können posturale Reaktionen auf unterschiedliche posturale Störungen erstmals miteinander verglichen werden.

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist der Vergleich der posturalen Reaktionen von jungen Erwachsenen bei unterschiedlichen posturalen Störungen. Hierfür wurde folgende konkrete Fragestellung formuliert:

Inwiefern hat die Präparation und die Reihenfolge Einfluss auf die antizipativen und kompensatorischen posturalen Anpassungen zur Reaktion auf posturale Störungen bei jungen Erwachsenen?

Um die formulierte Fragestellung wissenschaftlich zu überprüfen, wurden die nachfolgenden Hypothesen aufgestellt:

1. Je zeitlich vorhersehbarer die Präparation ist, desto besser kann sich das ZNS auf die Störung vorbereiten.
2. Bei zusätzlicher antizipierter Reihenfolge ist die muskuläre Aktivität vor der Störung höher und spezifischer.
3. Je bekannter die Störungseigenschaften (Präparation und Reihenfolge) sind, desto geringer ist die muskuläre und haltungsbedingte Reaktion auf die posturale Störung.

## **2 Methode**

### **2.1 Stichprobe**

Für die Studie wurden 40 gesunde Proband/-innen im Alter zwischen 16 und 30 Jahren einbezogen. Alle Probanden hatten keine körperlichen oder neurologischen Beschwerden. Sie wurden alle über den Verlauf und das Ziel der Studie informiert und haben vor der Teilnahme an der Studie die Einverständniserklärung unterzeichnet. Für die Auswertung konnten die Daten aller 40 Probanden (Geschlecht: m = 14, w = 26, Alter  $22.85 \pm 3.89$  Jahre, Körpergröße  $173 \pm 8.13$  cm, Gewicht  $67.6 \pm 10.1$  kg) verwendet werden.

### **2.2 Design der Studie**

Es handelte sich bei dieser Arbeit um eine Querschnittsstudie. Die Probanden absolvierten eine einmalige Messung, welche einen Gleichgewichtstest (GG), einen Test der maximalen Muskelaktivität (EMG), Countermovement-Jumps (CMJ) und Reaktionen auf unterschiedliche posturale Störungen (PER) enthielten. Vor jedem Test wurden die Probanden mündlich über den Ablauf informiert.

Alle Probanden starteten mit dem GG. Sie standen barfuss auf der Kraftmessplatte, mit den Händen in der Hüfte und blickten einen augenhohen Punkt an der Wand an. Der GG bestand aus fünf unterschiedlichen Tests, welche je zweimal durchgeführt wurden. Die Probanden erhielten die Aufgabe, während 30 Sekunden so ruhig wie möglich zu stehen. Der Experimentator fragte vor jeder Aufnahme «bereit», wenn der Proband mit «ja» antwortete, gab der Experimentator das Startsignal «go». Während den unterschiedlichen Tests war es still, damit sich der Proband maximal konzentrieren konnte. Wenn die 30 Sekunden vorbei waren, wurde dies durch ein Stoppsignal des Experimentators mitgeteilt. Zwischen den verschiedenen Versuchen des Tests hatten die Probanden kurze Pausen von 30 – 60 Sekunden, damit sie sich erholen konnten. Zwischen den Versuchen wurden die Probanden über den Ablauf und die Durchführung instruiert. Jeder Versuch wurde durch den Experimentator demonstriert.

Danach wurde der Test EMG für die Muskeln m. soleus (SOL), m. gastrocnemius medialis (GM) und m. tibialis anterior (TA) durchgeführt. Pro Muskel absolvierten die Probanden für drei Sekunden je zwei Durchläufe eine MVC-Übung (maximal voluntary isometric contraction) sowie eine Plantarflexion (SOL, GM) oder eine Dorsalextension (TA). Die Probanden wurden vor jedem Test mündlich instruiert. Der Zeitpunkt der Kontraktion und die Pausen zwischen den Kontraktionen konnten frei gewählt werden.

Als nächstes absolvierten die Probanden sechs maximale CMJ. Sie standen barfuss auf der Kraftmessplatte und erhielten mündlich die Instruktionen mit einer gleichzeitigen Demonstration durch den Experimentator. Sie mussten vor jedem Sprung zwei Sekunden stillstehen, maximal abspringen und wieder auf der Kraftmessplatte landen. Der Zeitpunkt der Sprünge und die Pausen zwischen den Sprüngen konnten die Probanden selbst wählen.

Die letzte Testreihe, die PER-Tests, wurde auf einer Störungsplattform gemacht. Die Probanden standen barfuss auf der Störungsplattform und schauten auf ein Kreuz, welches auf Augenhöhe vor ihnen an einer Wand fixiert wurde. Sie wurden aufgefordert, locker und hüftbreit auf der Platte zu stehen und die unterschiedlichen Störungen auszugleichen. Der Test startete mit drei Probedurchläufen, welche nicht registriert wurden. Es ertönte ein Signal, worauf jeweils nach einer Sekunde eine Störung eintraf. In den Probedurchläufen trafen vier Störungen in der Reihenfolge rechts, links, vorne und hinten ein. Beim ersten Probedurchlauf haben die Probanden die Bewegungen der Störungsplattform beobachtet, bei den beiden anderen Versuchen standen sie bereits auf der Störungsplattform. Danach begann der Test, wobei sechs Durchgänge registriert wurden. Es wurde zwischen dem Start der Störung (Präparation) und der Störungsrichtung (Reihenfolge) unterschieden. Die Abfolge der Präparationen (*known, unknown, self*) wurde randomisiert. Bei jeder Präparation wurden beide Reihenfolgen (*blocked, random*) randomisiert nacheinander gemessen, wobei jeder Proband mindestens einmal mit der Reihenfolge *random* startete. Vor jeder Bedingung wurden die Probanden mündlich über die Eigenschaften der Bedingung informiert. Während der Instruktion durften die Probanden die Störungsplattform verlassen und eine kurze Pause machen. Gesamthaft hat jeder Proband 108 Störungen ausgeglichen [Reihenfolge (*blocked* (16) + *random* (20)) \* Präparation (3)].

Alle Tests wurden im bewegungswissenschaftlichen Labor der Universität Fribourg durchgeführt.

### **2.3 detaillierter Beschrieb der Untersuchungsmethoden und –instrumente**

Die unterschiedlichen GG-Tests sind in der untenstehenden Tabelle aufgelistet (siehe Tabelle 2). Die Probanden hatten bei jedem Test die Augen offen. Die ersten beiden Aufgaben waren bipedal - der Romberg-Stand und der Tandem-Stand. Weiter mussten sich die Probanden für ihr stärkeres Bein entscheiden und auf diesem Bein die monopedalen Tests absolvieren. Die beiden letzten Gleichgewichtsübungen wurden auf einem Kreisel (Durchmesser 37 cm, Höhe 9.5 cm, Sport-Thieme, Grasleben, Deutschland) absolviert, zuerst bipedal, dann monopodal auf dem gleichen Bein, wie bei der ersten monopedalen Übung.

Tabelle 2

*Körperhaltung bei den unterschiedlichen Gleichgewichtstests*

Test	Körperhaltung vor der Testserie
Romberg-Stand	Bipedaler aufrechter Stand, Füße zusammen, Hände in der Hüfte
Tandem-Stand	Bipedaler aufrechter Stand, Füße voreinander während die Ferse des vorderen Fusses die Zehen des hinteren Fusses berühren, Hände in der Hüfte
Einbeinig	Monopedaler aufrechter Stand, das andere Bein in der Kniekehle des Standbeins, Hände in der Hüfte
Kreisel zweibeinig	Bipedaler aufrechter Stand, hüftbreite Position auf dem Kreisel, Hände in der Hüfte
Kreisel einbeinig	Monopedaler aufrechter Stand auf dem Kreisel, das andere Bein in der Kniekehle des Standbeins, Hände in der Hüfte

Alle GG-Tests wurden auf einer Kraftmessplatte (508\*464 mm; OR6-7 Kraftmessplatte; Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA) absolviert, um den COP zu messen. Kraftmessplattensignale wurden abgefragt (2 kHz) und erweitert (GEN 5, Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA). Es wurde der totale Schwankweg des COP [cm] erfasst. Die CMJ wurden auf derselben Kraftmessplatte registriert, wobei die Time (Flughöhe / Zeit) ausgewertet wurde.

Die Tests der maximalen EMG-Aktivität sind in der Tabelle 3 aufgelistet. Für das EMG (Myon wireless EMG, myon AG, Schwarzenberg, Schweiz) wurde den Probanden am rechten Bein auf den Muskelbauch der Muskeln m. gastrocnemius medialis, m. tibialis anterior und m. soleus Elektroden aufgeklebt. Die EMG-Daten wurden verstärkt (x1000), Bandpass gefiltert (10-1000 Hz) und mit 2 kHz in einer Software registriert (Imago Record, Pfitec, Endingen, Deutschland).

Tabelle 3

*Körperhaltung und verbale Instruktion bei den unterschiedlichen EMG-Tests*

Muskel	Test	Körperhaltung und verbale Instruktion vor jeder Testserie
SOL	MVC	Sitzend, rechtes Bein im 90°-Winkel mit einem Spannset an ein Holzbrett festgebunden, die Hände locker in der Hüfte «Versuche das Spannset zu zerreißen, indem du den Fuss für drei Sekunden maximal streckst.»
SOL	Plantarflexion	Sitzend, rechtes Bein im 90°-Winkel, linkes Bein angewinkelt mit dem Fuss auf dem rechten Oberschenkel, die Hände locker in der Hüfte «Strecke deinen Fuss für drei Sekunden maximal.»
GM	MVC	Bipedaler aufrechter Stand, mit beiden Füßen und gestreckten Beinen auf einem Holzbrett mit veränderbarer Grösseneinstellung der Henkel für die Hände, mit den Händen und gestreckten Armen die Henkel haltend «Versuche die Henkel aus der Verankerung auszureißen, indem du auf deine Zehenspitzen stehst.»
GM	Plantarflexion	Bipedaler aufrechter Stand «Stehe während drei Sekunden auf die Zehenspitzen. Versuche deinen Fuss dabei maximal zu strecken.»
TA	MVC	Bipedaler aufrechter Stand, rechter Vorderfuss unter einem präparierten Holzklötz, Experimentator auf dem Holzklötz «Versuche mich durch das Anziehen des Vorderfusses hochzuheben, ohne dass die Ferse den Boden verlässt.»
TA	Dorsalextension	Bipedaler aufrechter Stand «Ziehe den rechten Fuss maximal zu deinem Schienbein.»

*Anmerkung.* SOL= m. soleus. GM = m. gastrocnemius medialis. TA = m. tibialis anterior. MVC = maximal voluntary isometric contraction.

Vor dem letzten Test wurden die Probanden mit fünf Markern versehen. Die Marker wurden mittig auf dem Fussrücken, Fussknöchel (os. malleolus lateralis), os. caput fibulae, os. trochanter major und os. spina iliaca anterior superior befestigt, damit zusätzlich zum EMG die Körperposition registriert werden kann. Die Körperposition wurde durch den OptiTrack

(NaturalPoint, Corvallis, OR, USA) mit 350 fps (frames per second) aufgezeichnet. Danach wurden die Winkel zweidimensional (a-p) in MatLab offline berechnet.

Die PER-Tests wurden auf einer Störungsplattform gemacht. Die translationalen Störungen wurden von einer spezialangefertigten Störungsmaschine ausgelöst. Die Maschine ist mit zwei Motoren (Kollmorgen Servomotor AKM65P-ANCNC-00, Kollmorgen, Radford, VA 24141, USA) ausgestattet, welche die Plattform entweder in eine anterior-posterior-Richtung oder links-rechts-Richtung bewegt. Die Störungen bestanden aus unterschiedlichen Präparationen und Reihenfolgen. Es gab drei Präparationen der Störung:

1. *known*: Alle 8 Sekunden ertönte ein Signal, worauf eine Sekunde später die Störung folgte.
2. *unknown*: Irgendwann zwischen 8 – 16 Sekunden traf die Störung ein. Der computer-gesteuerte Start der Störung war auch dem Experimentator unbekannt.
3. *self*: Die Störung wurde, nach mindestens 8 Sekunden Wartezeit, durch einen Auslöseknopf selbst direkt ausgelöst.

Jede Präparation wurde in zwei verschiedenen Reihenfolgen absolviert:

1. *blocked*: Antizipierte Störungsrichtung. Die Störung erfolgte immer nach hinten (16x).
2. *random*: Nicht-antizipierte Störungsrichtung. Die computergesteuerte Störung erfolgte in zufälliger Reihenfolge nach links (4x), rechts (4x), vorne (4x) oder hinten (8x), wobei die eintreffende Störungsrichtung auch dem Experimentator unbekannt war.

## 2.4 Auswertung und statistische Analyse der Daten

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden nur Daten des Hauptmuskels SOL ausgewertet. Bezüglich der EMG-Aktivität wurden die Mittelwerte folgender Parameter ausgewertet:

1. EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung [mV]
2. Start der EMG-Aktivität nach der Störung [ms], definiert durch die Schwelle  $bEMG + \text{Standardabweichung } bEMG$
3. EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung [mV]

Weiter wurden die Winkel vor der Störung von -500 ms bis zum Start der Störung und die maximale Winkelveränderung nach der Störung des Fuss-, Knie- und Hüftgelenks ausgewertet. Die Daten wurden mit dem Statistikprogramm Jamovi (Version 1.0.8.0) ausgewertet. Die muskuläre und haltungsbedingte Reaktion auf posturale Störungen wurde mit einer 3x2 ANOVA mit dem Faktor Präparation (*known*, *unknown*, *self*) und Reihenfolge (*blocked*, *random*) analysiert. Wenn ein signifikanter F-Wert ( $p < .05$ ) nachgewiesen werden konnte, wurde eine

Bonferroni-korrigierte Post-hoc-Analyse durchgeführt, um die signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Faktorstufen herauszufinden.

Die Effektstärke der ANOVA wurde mit dem partiellen Eta-Quadrat ( $\eta^2_p$ ; small effect: .02; medium effect: .13; large effect: .26) gezeigt.

### 3 Resultate

#### 3.1 EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung

Die EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung [mV] unterschied sich in den Präparationen signifikant ( $F(2,78) = 3.6, p = .032, \eta^2_p = .09$ ). Die Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zu den Präparationen haben die Signifikanz knapp verfehlt, jedoch war eine Tendenz des Unterschiedes der Präparation *unknown* von den Präparationen *known* und *self* zu sehen (siehe Abbildung 14). Die Interaktion von Präparation \* Reihenfolge wies einen hochsignifikanten ( $F(2,78) = 9.79, p < .001, \eta^2_p = .20$ ) Unterschied auf.

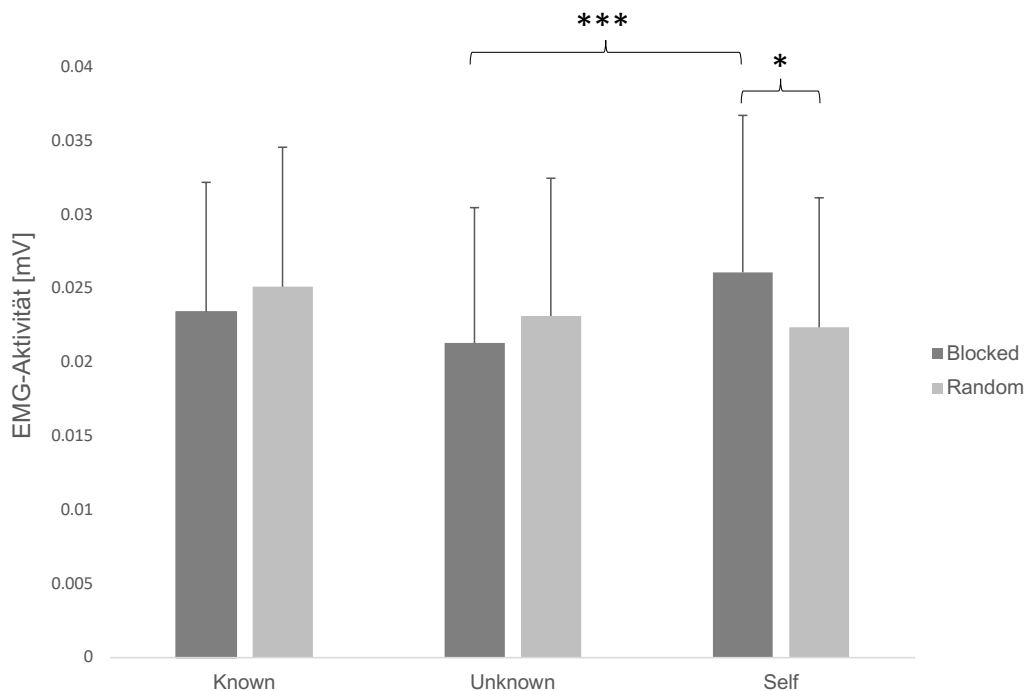


Abbildung 14. Mittelwert und Standardabweichung der EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung [mV] aller Präparationen. Dunkelgrau beschreibt die Präparation unter der Reihenfolge *blocked*, hellgrau unter der Reihenfolge *random*. Effekte für Präparation:  $p = .032$ ; Interaktion:  $p < .001$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

Die Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zur Interaktion Präparation \* Reihenfolge zeigten, dass sich die Bedingungen *unknown blocked* und *self blocked* hochsignifikant ( $p < .001$ ) voneinander unterschieden. Die EMG-Aktivität bei der Bedingung *unknown blocked* war signifikant tiefer während -50 ms bis zum Start der Störung als bei der Bedingung *self blocked*. Die Probanden konnten bei der Bedingung *self* die Störung selbst auslösen und sich vorbereiten. Unter der Bedingung *self blocked*, wo zusätzlich die Störungsrichtung antizipiert war, zeigte sich eine höhere EMG-Aktivität als bei der Bedingung *self random*. Diese beiden Bedingungen unterschieden sich signifikant ( $p = .020$ ) voneinander.

### 3.2 Winkel des Fuss-, Knie- und Hüftgelenks vor der Störung

Für die Winkel vor der Störung der unterschiedlichen Gelenke wurde kein signifikanter Unterschied der Präparation und der Reihenfolge sowie der Interaktion zwischen Präparation \* Reihenfolge gefunden.

### 3.3 Start der EMG-Aktivität nach der Störung

Der Start der EMG-Aktivitäten [ms] unterschied sich in den Präparationen hochsignifikant ( $F(2,78) = 11.01, p < .001, \eta^2_p = .22$ ). Die Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zeigten, dass sich die Präparation *unknown* hochsignifikant ( $p < .001$ ) von den Präparationen *self* und *known* unterschied. Die EMG-Aktivität begann bei den Präparationen mit zeitlich vorhersehbarem Start der Störung – *self* und *known* – durchschnittlich früher als bei der Präparation *unknown* (siehe Abbildung 15). Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Präparation *self* und *known*. Für den Haupteffekt Reihenfolge und die Interaktion Präparation \* Reihenfolge wurde keine Signifikanz gefunden.

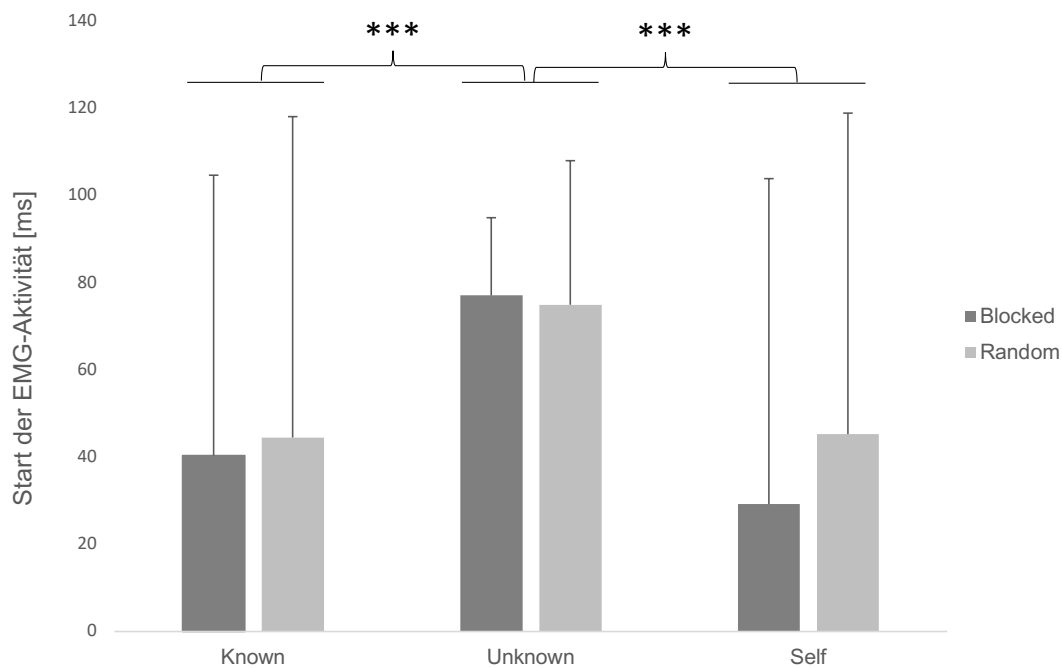


Abbildung 15. Mittelwert und Standardabweichung des Starts der EMG-Aktivität aller Präparationen. Dunkelgrau beschreibt die Präparation unter der Reihenfolge *blocked*, hellgrau unter der Reihenfolge *random*. Effekt Präparation:  $p < .001$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

### 3.4 EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung

Die Haupteffekte Präparation ( $F(2,78) = 15.15, p < .001, \eta_p^2 = .28$ ) und Reihenfolge ( $F(1,39) = 35.32, p < .001, \eta_p^2 = .48$ ) der EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung [mV] sind hochsignifikant ausgefallen. Die Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zeigten, dass sich die Präparation *unknown* hochsignifikant ( $p < .001$ ) von den Präparationen *self* und *known* unterschied. In der Präparation *unknown* zeigten die Probanden eine höhere EMG-Aktivität im Vergleich zu den Präparationen *known* und *self* (siehe Abbildung 16). Es wurde kein signifikanter Unterschied der EMG-Aktivität zwischen der Präparation *self* und *known* gefunden. Zudem zeigte sich eine signifikante Interaktion von Präparation \* Reihenfolge auf die EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung ( $F(2,78) = 3.74, p = .028, \eta_p^2 = .09$ ).

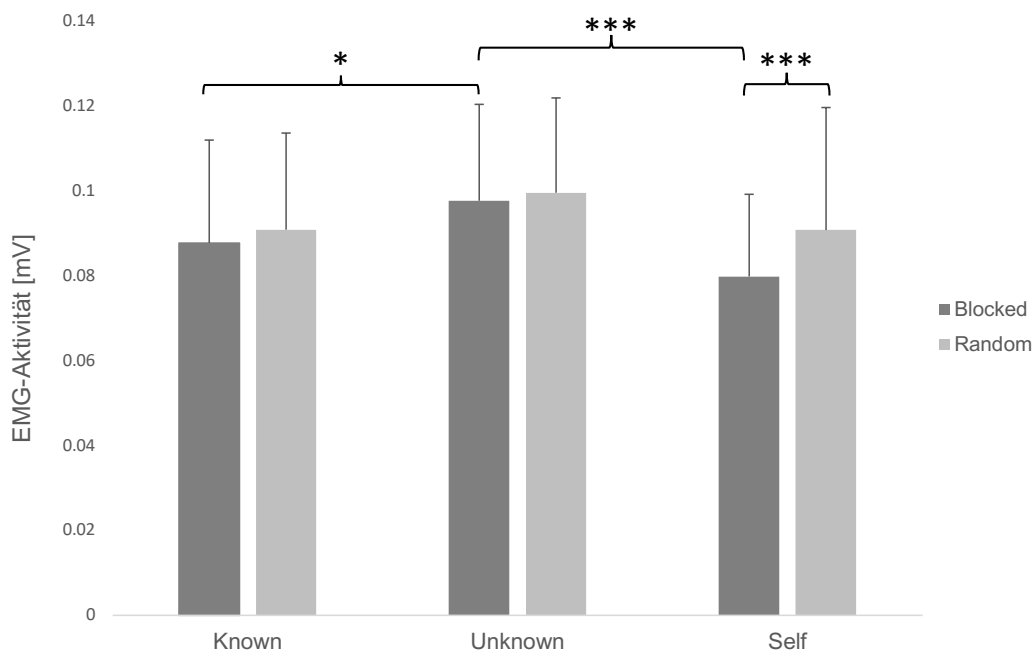


Abbildung 16. Mittelwert und Standardabweichung der EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung [mV] aller Präparationen. Dunkelgraue Balken zeigen die Reihenfolge *blocked* und hellgraue Balken die Reihenfolge *random*. Effekte für Präparation und Reihenfolge:  $p < .001$ ; Interaktion:  $p = .028$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

In den Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zur Interaktion von Präparation \* Reihenfolge wurde ein signifikanter Unterschied ( $p = .021$ ) zwischen *known blocked* und *unknown blocked* gefunden. *Known blocked* wies eine tiefere EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung auf als *unknown blocked*. Hochsignifikante Unterschiede ( $p < .001$ ) wurden zwischen *unknown blocked* und *self blocked* sowie auch zwischen *self blocked* und *self random* gefunden. Dies ist

vor allem auf die tiefe EMG-Aktivität bei *self blocked* zurückzuführen, wo der Start der Störung und die Störungsrichtung geplant werden konnte.

### 3.5 Maximale Winkelveränderung des Fussgelenks nach der Störung

Der Haupteffekt der Präparation bei der maximalen Winkelveränderung des Fussgelenks nach der Störung war signifikant ( $F(2,78) = 4.31, p = .017, \eta^2_p = .10$ ). Die Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zeigten, dass sich die Präparation *unknown* signifikant ( $p = .023$ ) von der Präparation *self* unterschied (siehe Abbildung 17). Der Haupteffekt der Reihenfolge ( $F(1,39) = 20.56, p < .001, \eta^2_p = .35$ ) und die Interaktion der Präparation \* Reihenfolge ( $F(2,78) = 9.37, p < .001, \eta^2_p = .19$ ) sind hochsignifikant ausgefallen.

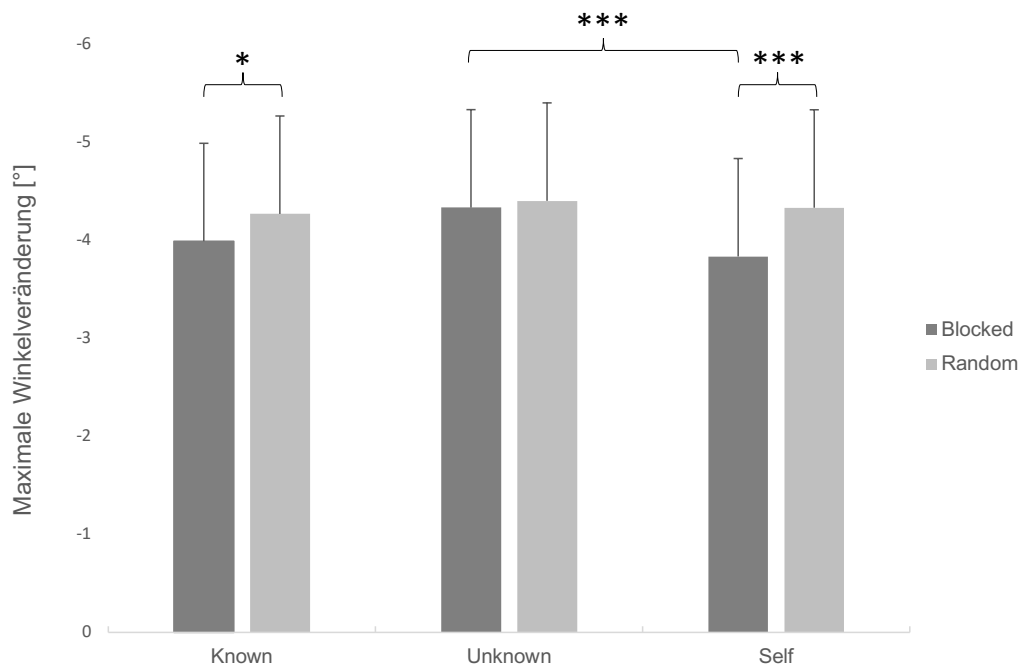


Abbildung 17. Mittelwert und Standardabweichung des maximalen Winkels des Fussgelenks nach der Störung aller Präparationen. Dunkelgrau beschreibt die Präparation unter der Reihenfolge *blocked*, hellgrau unter der Reihenfolge *random*. Effekte für Präparation:  $p = .017$ ; Reihenfolge und Interaktion:  $p < .001$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

Die Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zur Interaktion Präparation \* Reihenfolge zeigten einen signifikanten ( $p = .020$ ) Unterschied zwischen den Bedingungen *known blocked* und *known random*. Ein hochsignifikanter Unterschied ( $p < .001$ ) wurde zwischen den Bedingungen *unknown blocked* und *self blocked* sowie auch *self blocked* und *self random* gefunden, was vor allem mit der tiefen Winkelveränderung der Bedingung *self blocked* zusammenhängt.

### 3.6 Maximale Winkelveränderung des Hüftgelenks nach der Störung

Der Haupteffekt der Präparation der maximalen Winkelveränderung des Hüftgelenks nach der Störung wies eine Signifikanz ( $F(2,78) = 4.85, p = .010, \eta_p^2 = .11$ ) auf. Die Bonferroni-korrigierten Post-Hoc-Tests haben gezeigt, dass die Präparation *unknown* signifikant ( $p = .008$ ) von der Präparation *self* verschieden ist (siehe Abbildung 18). Es zeigte sich keine Signifikanz für den Haupteffekt Reihenfolge und die Interaktion Präparation \* Reihenfolge.

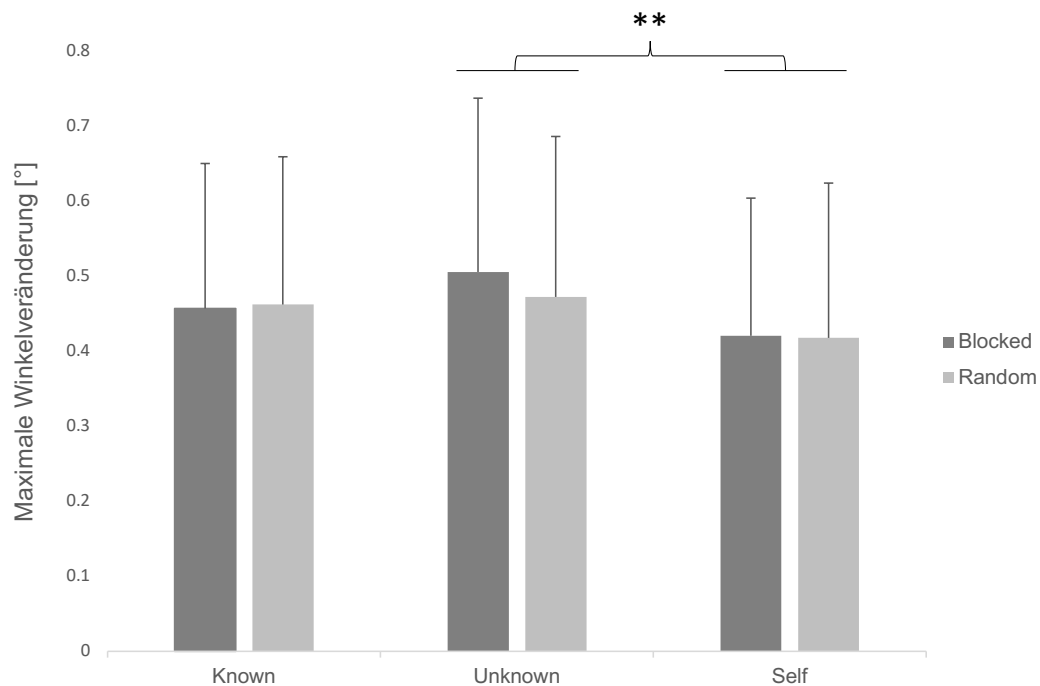


Abbildung 18. Mittelwert und Standardabweichung des maximalen Winkels des Hüftgelenks nach der Störung aller Präparationen. Dunkelgrau beschreibt die Präparation unter der Reihenfolge *blocked*, hellgrau unter der Reihenfolge *random*. Effekte für Präparation:  $p = .010$ ; \*\*  $p < .010$ .

## 4 Diskussion

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Fragestellung, inwiefern die Präparation und die Reihenfolge Einfluss auf die antizipativen und kompensatorischen posturalen Anpassungen bei der Reaktion auf posturale Störungen haben. Die jungen Erwachsenen waren bei der Untersuchung sechs Bedingungen ausgesetzt, welche sich in der Präparation und Reihenfolge unterschieden. Zur Beantwortung der vorliegenden Fragestellung wurden die Reaktionen in posturale Reaktionen vor der Störung und in posturale Reaktionen nach der Störung eingeteilt.

### 4.1 Posturale Reaktionen vor der Störung

**4.1.1 Muskuläre Reaktionen.** Die Resultate -50 ms bis zum Start der Störung zeigten keine signifikante Bonferroni-korrigierte Post-hoc-Analyse zwischen den Präparationen, jedoch war eine Tendenz ersichtlich, dass die Präparation *unknown* eine tiefere EMG-Aktivität vor der Störung aufzeigte, im Gegensatz zu den Präparationen *known* und *self*. Unter der Bedingung *known* und *self* war der Start der Störung zeitlich vorhersehbar, entweder durch ein Tonsignal oder durch die Selbstinitiierung. Santos et al. (2010a) beschrieben die Wichtigkeit der zeitlichen Vorhersehbarkeit, damit APAs generiert werden können, was durch die vorliegenden Resultate bestätigt werden konnte, da kein Unterschied zwischen den Präparationen *known* und *self* gefunden wurde. Unter der Bedingung *unknown* hingegen war keine zeitliche Vorhersehbarkeit vorhanden, was dazu führte, dass sich das ZNS nicht darauf vorbereiten konnte (Santos et al., 2010a).

Unter Einbezug der Reihenfolge lieferten meine Resultate hochsignifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen *unknown blocked* und *self blocked*, wobei die EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung bei *self blocked* höher war. Durch den zeitlich vollständig vorhersehbaren Start der Störung durch die Selbstinitiierung und die antizipierte Reihenfolge bei *self blocked* konnte sich das ZNS vollständig auf die Störung vorbereiten, um mit angemessener Strategie auf die erwartete Störung zu reagieren (Adkin et al., 2006; Aruin & Latash, 1995; Jacobs & Horak, 2007). Die hohe EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung bei der Bedingung *self blocked* kann auf die von Piscitelli et al. (2017) und Santos et al. (2010a) bewiesene reziproke Aktivierung des dorsalen Muskels, welcher zur Vorbereitung auf die Rückwärtsstörung diente, zurückzuführen sein, da in der vorliegenden Studie die EMG-Aktivität des dorsalen Muskels SOL ausgewertet wurde. Die Bedingung *self blocked* unterschied sich auch signifikant von der Bedingung *self random*, wo die Störung zwar selbst initiiert wurde, die Störungsrichtung aber nicht-antizipiert war. Unter der Bedingung *self random* war die EMG-

Aktivität signifikant tiefer. Dieses Resultat geht mit den Befunden von Piscitelli et al. (2017) einher, denn sie zeigten, dass bei nicht-antizipierter Störungsrichtung die APAs zu einer unidirektionalen Ko-Kontraktion der dorsalen und ventralen Muskeln wechseln, wodurch in meinen Resultaten die EMG-Aktivität des SOL unter der Bedingung *self random* tiefer war. Bei der Reihenfolge *random* werden APAs erzeugt, welche für grössere Belastungen geeignet sind oder die vorherige Störung versuchen zu skalieren (Piscitelli et al., 2017). Dieser Befund könnte mit der hohen EMG-Aktivität -50 ms bis zum Start der Störung von *known random* einhergehen. Unter der Bedingung *known blocked* wussten die Probanden bereits, dass eine Rückwärtsstörung eintreffen wird. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass eine Sekunde nicht ausreicht, damit das ZNS vollständig auf die Störung vorbereitet war. Das ZNS musste beim Signal schnell die Reaktionsstrategie zurechtlegen und hatte dadurch weniger Zeit, sich vollständig auf die Störung vorzubereiten. Dieses Resultat geht mit den Resultaten der Pilotenstudie von Aruin und Latash (1995) einher, welche sogar gar keine APAs unter der Bedingung *known blocked* gefunden haben (Aruin & Latash, 1995).

**4.1.2 Haltungsbedingte Reaktionen.** Die Resultate zu den haltungsbedingten Reaktionen vor der Störung zeigten, wie auch bei Santos et al. (2010b), keine signifikanten Winkelveränderungen in Fuss-, Knie- und Hüftgelenk. Sie zeigten, dass bei zeitlich vorhersehbaren Störungen durch die APAs eine Winkelveränderung der oberen Körpersegmente und eine COP-Verschiebung vor der Störung initiiert wurde. Bei den Bedingungen *known* und *self* wäre also das ZNS auf die Störung vorbereitet und könnte APAs generieren, wodurch die oberen Körpersegmente direkt in einer optimaleren Position gewesen sind. Bei *unknown* trägt die Unbekanntheit der Störungseigenschaften dazu bei, dass sich das ZNS nicht auf die Störung vorbereiten kann und dadurch auch keine vorbereitende Winkelveränderung stattfinden kann. Sie zeigten auch, dass die Winkelveränderung der unteren Körpersegmente nicht mit der Muskelaktivierung zusammenhängt, was in dieser Studie bestätigt werden konnte, da auch in der vorliegenden Arbeit unter den Präparationen *self*, *known* und *unknown* keine signifikanten Unterschiede der Winkelveränderung vor der Störung aufgezeigt wurde (Santos et al. 2010b).

Durch die vorliegenden Ergebnisse können die Hypothese 1 und 2 bestätigt werden, denn je zeitlich vorhersehbarer die Präparation war, desto besser konnte sich das ZNS auf die posturale Störung vorbereiten. Mit zusätzlicher antizipierter Reihenfolge war die muskuläre Aktivität vor der Störung spezifischer. Die Selbstinitiierung, welche aus der zeitlichen Vorhersehbarkeit und einer motorischen Aktivität zur Initiierung der Störung besteht, und die antizipierte Störungsrichtung sind notwendig, damit sich das System vollständig auf die nachfolgende Störung

vorbereiten kann (Aruin & Latash, 1995; Piscitelli et al., 2017). Nur unter vollständigem Wissen über die zeitliche Vorhersehbarkeit durch die Selbstinitiierung und zusätzlicher Reihenfolge, wie bei *self blocked*, war das ZNS im Vergleich zu den anderen Bedingungen vollständig auf die eintreffende posturale Störung vorbereitet.

## 4.2 Posturale Reaktionen nach der Störung

**4.2.1 Muskuläre Reaktionen.** Um die Reaktion nach der Störung auszuwerten wurde zwischen dem Start der EMG-Aktivität und der Reaktion zwischen 50 – 250 ms nach der Störung unterschieden.

Der Start der EMG-Aktivität zeigte, dass sich die Präparation *unknown* hochsignifikant von den Präparationen *known* und *self* unterscheidet. Wenn die Störung zeitlich vorhersehbar war, aktivierte sich die Feedforward-Kontrolle, wodurch sich das ZNS auf die Störung vorbereiten und direkt nach der Störung mit der ausgewählten Strategie reagieren konnte. Bei *unknown* war der Start der Störung zeitlich unvorhersehbar, wodurch sich das System auch nicht vorbereiten konnte (Adkin et al., 2006; Hay & Redon, 1999; Jacobs & Horak, 2007). Bezüglich der Reihenfolge gab es keine Signifikanz. Der Start der EMG-Aktivität nach der Störung ist von der zeitlichen Vorhersehbarkeit der Störung abhängig, wobei es nicht darauf ankommt, ob die Störungsrichtung antizipiert ist oder nicht. Die grossen Standardabweichungen unter der Präparationen *known* und *self*, könnten mit der Integration der Feedforward-Kontrolle in die Feedback-Kontrolle und den damit verbundenen grösseren Freiheitsgraden erklärt werden (Hay & Redon, 1999). Eine weitere Vermutung beschreibt Horak und Nashner (1986) durch die subjektabhängige Modifikation der vorausgewählten posturalen Synergien, um auf die Störung zu reagieren, welche sich durch die Erfahrung verschieben kann. Bei grösserer Erfahrung zeigte sich die Muskelaktivierung in einem distal-proximal Muster, wobei die untere Beinmuskulatur zuerst aktiviert wurde (Horak & Nashner, 1986).

Bei der EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung hat die Präparation *unknown* eine signifikant höhere EMG-Aktivität im Vergleich zu den Präparationen *known* und *self* aufgezeigt. Dadurch, dass bei *known* und *self* die Störung zeitlich vorhersehbar war und vorbereitet werden konnte, bedurfte das ZNS einer kleineren kompensatorischen Muskelreaktion, um die posturale Störung auszugleichen (Santos et al., 2010a). Die eingetretene Störung stimmte mit der erwarteten Störung bei *known* und *self* im Vergleich zu der Präparation *unknown* überein. Das ZNS bedurfte keiner Modifikation der Reaktion. Bei zeitlich unvorhersehbaren Störungen, wie bei *unknown*, ist das Feedforward-Modell nicht aktiv und das ZNS bedurfte einer On-line-Reaktionsmodifikation durch die Feedback-Kontrolle nach dem Auftreten der Störung, welche erst in

einer späteren Phase eintreffen konnte (Adkin et al., 2006; Hay & Redon, 1999; Jacobs & Horak, 2007).

Festgestellt wurden zudem hochsignifikante Unterschiede der Bedingung *self blocked* im Vergleich mit den Bedingungen *self random* und *unknown blocked*. Unter der Bedingung *self blocked* war die Reaktion massiv geringer. Das ZNS war vollständig über die eintreffende posturale Störung informiert und konnte dadurch die Feedforward-Kontrolle aktivieren, um die optimale Reaktionsstrategie festzulegen. Diese Generierung von APAs geht mit einer tieferen EMG-Aktivität nach der Störung einher. Schon nur die nicht-antizipierte Störungsrichtung, wie bei *self random*, war ausreichend, damit die kompensatorische Muskelreaktion auf die posturale Störung höhere Aktivitäten zeigte (Hay & Redon, 1995; Piscitelli et al., 2017). Die muskuläre Reaktion war noch höher bei *unknown blocked*. Dieses Resultat unterstützt die Aussage von Santos et al. (2010a), dass bei *unknown blocked* die CPAs viel grösser waren im Vergleich zu *self blocked*, da unter dieser Bedingung durch die fehlende zeitliche Vorhersehbarkeit keine APAs verfügbar waren. Das ZNS brauchte die CPAs der Feedback-Kontrolle, damit die posturale Kontrolle wiedererlangt werden konnte (Santos et al., 2010a).

Der Unterschied der EMG-Aktivität 50 – 250 ms nach der Störung war zwischen den Bedingungen *known blocked* und *unknown blocked* zwar signifikant, jedoch kleiner als im Vergleich zu der Bedingung *self blocked*. Durch das vollständige Wissen über die Störungseigenschaften, welche die Präparation und Reihenfolge beinhalten, kann sich das ZNS vollständig auf die auftretende posturale Störung einstellen, ohne dass eine Eigenschaft erraten oder spekuliert werden muss, woraus die tiefere EMG-Aktivität unter *self blocked* zurückzuführen ist (Piscitelli et al. 2017). Bei *known blocked* wurde bereits ein Faktor entnommen, nämlich die Selbstinitiierung, bei *unknown blocked* zusätzlich noch die zeitliche Vorhersehbarkeit des Starts der Störung.

**4.2.2 Haltungsbedingte Reaktionen.** Die haltungsbedingten Reaktionen auf posturale Störungen zeigten signifikante Resultate für die Winkelveränderung im Fuss- und Hüftgelenk. Die Winkelveränderung des Fussgelenks ergab signifikante Unterschiede zwischen der Präparation *unknown* und *self*. Die Winkelveränderung war bei *unknown blocked* hochsignifikant grösser als bei *self blocked*. Auch hier zahlt sich die vollständige Vorbereitung des ZNS auf die eintreffende posturale Störung aus, da nach Santos et al. (2010b) die oberen Körpersegmente und der COP bereits vor der Störung optimal darauf vorbereitet wurden, was mit einer kleineren Winkelverschiebung der unteren Körpersegmente nach der Störung einher ging. Bei *unknown blocked* brauchte das ZNS Bewegungen im Fussgelenk, damit die posturale Kontrolle vollständig wiedererlangt werden konnte (Santos et al., 2010b). Spannend war der Unterschied zwischen

*known blocked* und *known random*. Durch das zusätzliche Wissen über die Störungsrichtung bei *known blocked* im Vergleich zu *known random* waren die Winkelveränderungen im Fussgelenk kleiner. Die Probanden konnten bei *known blocked* die Strategie vordefinieren, da die Störungsrichtung immer rückwärts war. Bei *known random* hingegen, muss die Strategie immer wieder angepasst werden, da die Störungsrichtung nicht-antizipiert war (Nashner & Horak, 1986).

Das Hüftgelenk wies im Vergleich dazu nur einen kleinen, aber signifikanten Unterschied zwischen den Präparationen *unknown* und *self* auf, ohne Berücksichtigung der Reihenfolge. Eine erste Erklärung betrifft die zeitliche Vorhersehbarkeit des Starts der Störung. Das ZNS konnte bei *self* bereits vor der Störung posturale Synergien bereitstellen, womit auf die Störung reagiert wird, was mit einer kleineren kompensatorischen Reaktion zusammenhängt. Bei *unknown* hingegen, konnte sich das ZNS nicht auf eine Störung vorbereiten, da der Start der Störung zeitlich unvorhersehbar war und brauchte somit eine grössere Bewegung in den proximalen Gelenken für die Wiederherstellung der posturalen Kontrolle (Santos et al., 2010b). Weiter besteht die Möglichkeit, dass die 108 ausgeglichenen Störungen in der vorliegenden Studie zu einem Lerneffekt oder Erfahrung in Bezug auf die Verschiebungsdistanz und Geschwindigkeit geführt haben. Dadurch war das ZNS auch bei der Bedingung *unknown* auf die Störungsgrösse vorbereitet, auch wenn der Start der Störung zeitlich unvorhersehbar war (Horak & Nashner, 1986). Aus diesem Grund besteht trotzdem ein kleiner Unterschied zwischen der Winkelverschiebung der Hüfte bei *self* und *unknown*. Eine letzte Begründung bezieht sich auch auf die Störungsgrösse, und zwar, dass die Verschiebungsdistanz der Störungsplattform zu gering oder die Verschiebungsgeschwindigkeit zu hoch war, damit einen grösseren Unterschied der Winkelverschiebung im Hüftgelenk gezeigt werden konnte. Der Anteil der Winkelverschiebung des Hüftgelenks nimmt mit zunehmender Verschiebungsdistanz zu und mit zunehmender Geschwindigkeit ab (Freyler et al., 2015).

Die dritte Hypothese besagte, dass je bekannter die Störungseigenschaften (Präparation und Reihenfolge) sind, desto geringer ist die muskuläre und haltungsbedingte Reaktion auf posturale Störungen. Diese Hypothese kann vollständig angenommen werden. Dadurch, dass bei *self* und *known* der Start der Störung zeitlich vorhersehbar war, konnten APAs generiert werden. Bei zusätzlicher antizipierter Reihenfolge (*blocked*) wurden posturale Synergien aktiviert, um damit auf die Störung zu reagieren. Die erwartete Störung wird mit der tatsächlichen Störung übereinstimmen, wodurch keine Modifikation stattfinden musste. Die CPAs zeigten aus diesem Grund geringere Reaktionen. Das ZNS verwendete die Strategie, damit die oberen Körpersegmente und der COP bereits vor der Störung in einer optimalen Position waren und bedurften

dadurch keiner Modifikation in unteren Körpersegmenten nach der Störung, um die posturale Kontrolle wiederherzustellen. Im Gegensatz dazu steht die Präparation *unknown*. Weil der Start der Störung zeitlich unvorhersehbar war, konnte sich das ZNS nicht auf die Störung vorbereiten, egal ob die Reihenfolge antizipiert (*blocked*) oder nicht-antizipiert (*random*) war. Die Präparation *unknown* bedurfte grossen CPAs nach der Störung, welche durch hohe EMG-Aktivitäten und grösseren Winkelverschiebungen ersichtlich waren, damit die posturale Kontrolle wiedererlangt werden konnte.

## 5 Schlussfolgerung

Durch die vorliegende Arbeit, wobei erstmals die Präparationen *self*, *known* und *unknown* unter der Reihenfolgen *blocked* und *random* miteinander verglichen wurden, konnte die Wichtigkeit des Wissens über die Störungseigenschaften und die damit verbundenen antizipativen und kompensatorischen posturalen Anpassungen bei den Reaktionen auf unterschiedliche Störungen bei jungen Erwachsenen aufgezeigt werden. Wenn die Störung vollständig vorhersehbar war, das heisst der Start der Störung mit antizipierter Störungsrichtung selbst-initiiert, hat sich das ZNS durch APAs vor der Störung vollständig darauf eingestellt, was mit kleineren CPAs bei der Reaktion nach der Störung einher ging. Sobald ein Faktor verändert wurde, sei es die Präparation oder die Reihenfolge, war die Vorbereitung geringer und die Reaktion grösser, was in den Bedingungen *self random*, *known blocked* und *known random* ersichtlich war. Die Selbstinitiation und die antizipierte Störungsrichtung - wie bei *self blocked* - zusammen, sind die essentiellen Faktoren, damit sich das ZNS vollständig und korrekt auf die Störung vorbereiten kann. Sobald jedoch der Start der Störung, wie bei der Präparation *unknown*, zeitlich unvorhersehbar ist, spielt die Reihenfolge keine Rolle mehr. Die Resultate für die Bedingungen *unknown blocked* und *unknown random* haben unter keinem ausgewerteten Parameter signifikante Unterschiede aufgezeigt.

Spannend wären weiterführende Studien, welche zusätzliche Parameter, wie zum Beispiel die Gleichgewichtsfähigkeit, das Alter und die Reaktionskraft einbeziehen, um die Reaktion auf posturale Störungen noch besser verstehen zu können. Je besser die posturalen Reaktionen mit vielen Parameter verstanden und erklärt werden, desto bessere Möglichkeiten können den Personen mit geschwächter posturalen Kontrolle geboten werden, damit Störungen nicht zu einem Sturz führen.

Abschliessend kann gesagt werden, dass nur wenn die Präparation zeitlich vorhersehbar und die Reihenfolge antizipiert ist, sich das ZNS optimal vorbereiten kann. Ein Faktor alleine ist nicht ausreichend. Durch die Feedforward-Kontrolle aktiviert das ZNS APAs und posturale Synergien, welche auf die eintreffende Störung abgestimmt sind. Sobald ein Faktor verändert wird, bedarf das ZNS einer grösseren kompensatorischen Reaktion. Die Feedforward-Kontrolle kann dabei die Störung nicht vollständig vorbereiten, worauf die Feedback-Kontrolle CPAs generieren muss. Wenn die Präparation zeitlich unvorhersehbar ist, wie bei *unknown*, so spielt die Reihenfolge keine Rolle mehr, da sich das ZNS nicht auf den Start der Störung vorbereiten kann. Somit findet keine Feedforward-Kontrolle statt, wodurch die Feedback-Kontrolle die posturale Kontrolle wiederherstellen muss.

## Literatur

- Ackermann, H., Dichgans, J. & Guschlbauer, B. (1991). Influence of an acoustic preparatory signal on postural reflexes of the distal leg muscles in humans. *Neuroscience Letters*, *127*, 242-246.
- Adkin, A. L., Quant, S., Maki, B. E. & McIlroy W. E. (2006). Cortical responses associated with predictable and unpredictable compensatory balance reactions. *Experimental Brain Research*, *172*, 85-93. doi: 10.1007/s00221-005-0310-9
- Aruin, A. S. & Latash, M. L. (1995). The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations. *Experimental Brain Research*, *106*, 291-300.
- Beratungsstelle für Unfallverhütung BFU. (2019). Status 2019: Statistik der Nichtberufsunfälle und des Sicherheitsniveaus in der Schweiz. Strassenverkehr, Sport, Haus und Freizeit [pdf]. Zugriff unter [https://www.bfu.ch/api/publications/bfu\\_2.360.01\\_status%202019%20-%20statistik%20der%20nichtberufsunfälle%20und%20des%20sicherheitsniveaus%20in%20der%20schweiz%20.pdf](https://www.bfu.ch/api/publications/bfu_2.360.01_status%202019%20-%20statistik%20der%20nichtberufsunfälle%20und%20des%20sicherheitsniveaus%20in%20der%20schweiz%20.pdf)
- Freyler, K., Gollhofer, A., Colin, R., Brüderlin, U. & Ritzmann, R. (2015). Reactive Balance Control in Response to Perturbation in Unilateral Stance: Interaction Effects of Direction, Displacement and Velocity on Compensatory Neuromuscular and Kinematic Responses. *Plos One*, *10*(12), 1-18. doi: 10.1371/journal.pone.0144529
- Hay, L. & Redon, C. (1999). Feedforward versus feedback control in children and adults subjected to a postural disturbance. *Experimental Brain Research*, *125*, 153–162.
- Hooks, B. M. (2016). Sensorimotor Convergence in Circuitry of the Motor Cortex. *Neuroscientist*, *23*(3), 251-263.
- Horak, F. B. (1987). Clinical measurement of postural control in adults. *Physical Therapy*, *67*(12), 1881-1885.
- Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls. *Age and Aging*, *35*(2), 7-11. doi: 10.1093/ageing/afl077
- Horak, F. B. & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, *55*, 1369-1381.
- Huber, M. (2016). Posturale Kontrolle. *Neuroreha*, *8*, 158-162. doi: 10.1055/s-0042-118059
- Jacobs, J. V. & Horak, F. B. (2007). Cortical control of postural responses. *Journal of Neural Transmission*, *114*, 1339-1348. doi: 10.1007/s00702-007-0657-0

- Nashner, L. M. (1982). Adaptations of human movement to altered environments. *Trends in Neuroscience*, 5, 358-361.
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G. & Myklebust, B. M. (1996). Measures of Postural Steadiness: Differences Between Healthy Young and Elderly Adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956-966.
- Piscitelli, D., Falaki, A., Solnik, A. & Latash, M. L. (2017). Anticipatory postural adjustments and anticipatory synergy adjustments: Preparing to a postural perturbation with predictable and unpredictable direction. *Experimental Brain Research*, 235(3), 713-730. doi:10.1007/s00221-016-4835-x
- Santos, M. J., Kanekar, N. & Aruin, A. S. (2010a). The Role of Anticipatory Postural Adjustments in Compensatory Control of Posture: 1. Electromyographic data. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20, 388-397.
- Santos, M. J., Kanekar, N. & Aruin, A. S. (2010b). The Role of Anticipatory Postural Adjustments in Compensatory Control of Posture: 2. Biomechanical Analysis. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20(3), 398-405. doi: 10.1016/j.jelekin.2010.01.002
- Taube, W. (2013). Neuronale Mechanismen der posturalen Kontrolle und der Einfluss von Gleichgewichtstraining. *Journal für Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie*, 14(2), 55-63.
- Wälchli, M. (2018). *The effect of child-oriented balance training with a special focus on compensatory postural responses to anticipated and non-anticipated perturbations* (Dissertation, Department of Neurosciences and Movement Science, University of Fribourg, Switzerland).