

---

Aus der Neurologischen Klinik und Poliklinik  
Klinik der Universität München  
Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. Marianne Dieterich

***Kopf-Rumpf Koordination bei Gesunden im  
Altersverlauf und bei Patienten mit bilateraler  
Vestibulopathie***

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Julian Decker

aus

Oberkirch

Jahr

2023

---

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Klaus Jahn

Mitberichterstatter: PD Dr. Ina Giegling  
Prof. Dr. Andreas Zwergal

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter: PD Dr. Roman Schniepp

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 12.10.2023

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>x</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>x</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>1</b>
2.1 Posturale Kontrolle . . . . .	1
2.1.1 Sensorische Systeme . . . . .	2
2.1.2 Integration der sensorischen Informationen . . . . .	3
2.2 Geschwindigkeitsabhängigkeit . . . . .	5
2.3 Posturale Kontrolle und kognitive Dual Task Paradigmen . . . . .	6
2.4 Kopf-Rumpf-Stabilität . . . . .	6
2.5 Stürze . . . . .	7
<b>3 Zielsetzung</b>	<b>9</b>
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>10</b>
4.1 Hilfsmittel . . . . .	10
4.2 Studienteilnehmer . . . . .	11
4.2.1 Ethische Richtlinien . . . . .	11
4.2.2 Charakterisierung der Probanden . . . . .	11
4.3 3D Motion Tracking . . . . .	12
4.3.1 Marker Position . . . . .	12
4.4 Inertial Messeinheit . . . . .	14
4.4.1 Sensorposition . . . . .	15
4.5 Synchronisation der Geräte . . . . .	15
4.6 Versuchsprotokoll . . . . .	16
4.7 Statistische Auswertung . . . . .	17

<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>19</b>
5.1	Ganggeschwindigkeiten . . . . .	20
5.1.1	Untergruppenvergleich . . . . .	20
5.1.2	Kontrollgruppe vs. BVP-Gruppe . . . . .	22
5.2	Beschleunigung . . . . .	25
5.2.1	IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich . . . . .	25
5.2.2	IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert .	27
5.2.3	IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich . . . . .	30
5.2.4	IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert	32
5.2.5	IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich . . . . .	34
5.2.6	IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert	36
5.2.7	IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich . . . . .	39
5.2.8	IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert	41
5.2.9	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich . . . . .	43
5.2.10	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeits- korreliert . . . . .	45
5.2.11	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich . . . . .	47
5.2.12	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeits- korreliert . . . . .	49
5.3	Winkelgeschwindigkeit . . . . .	52
5.3.1	IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich . . . . .	52
5.3.2	IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert .	55
5.3.3	IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich . . . . .	57
5.3.4	IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert	59
5.3.5	IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich . . . . .	61
5.3.6	IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert	64
5.3.7	IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich . . . . .	66
5.3.8	IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert	68
5.3.9	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich . . . . .	70
5.3.10	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeits- korreliert . . . . .	72
5.3.11	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich . . . . .	74
5.3.12	IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeits- korreliert . . . . .	76
5.4	Reids Plane . . . . .	79
5.4.1	Hauptgruppenvergleich . . . . .	79
5.4.2	Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert . . . . .	81
5.4.3	Untergruppenvergleich . . . . .	83
5.4.4	Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert . . . . .	86
5.5	Rumpf-Kopf-Position . . . . .	88
5.5.1	Hauptgruppenvergleich . . . . .	89
5.5.2	Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert . . . . .	91
5.5.3	Untergruppenvergleich . . . . .	93

---

5.5.4	Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>97</b>
6.1	Ganggeschwindigkeit . . . . .	98
6.2	Kopfpartie . . . . .	98
6.3	Rumpfbewegung . . . . .	99
6.4	Kopf-/Rumpfbewegung . . . . .	100
6.5	Kognitiver Dual Task und Feedback Model . . . . .	100
6.6	Methodenkritik . . . . .	100
6.7	Fazit . . . . .	101
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>109</b>
8.1	Raspberry Pi C++ Quellcode . . . . .	109
	<b>Danksagung</b>	<b>110</b>
	<b>Affidavit</b>	<b>111</b>

**Tabelle 1:** Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
DT	Dual Task
BVP	bilateral vestibulopathy (bilaterale Vestibulopathie)
COP	Center of Pressure
HC	healthy control (gesunde Kontrolle)
IMU	inertial measurement unit (Inertiale Messeinheit)
RP	Reids Plane
DSGZ	Deutsches Schwindel- und Gleichgewichtszentrum
TTL	Transistor-Transistor-Logik

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Model Vestibularorgan nach (Pfeiffer et al., 2014) (abgewandelt nach NASA Abbildungen) . . . . .	3
2.2	Feedback Modell nach Peterka et al. (2011) . . . . .	5
4.1	Schematische Darstellung der Marker- / Sensorpostionen . . . . .	14
4.2	Beispieldatensatz einer einzelnen IMU Einheit mit Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit . . . . .	15
4.3	RGB Kamerabild (rechts), Qualisys Marker Repräsentation in der 3D Software (links) . . . . .	16
5.1	Untergruppenvergleich Ganggeschwindigkeiten; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie	20
5.2	Hauptgruppenvergleich Ganggeschwindigkeit; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	22
5.3	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	25
5.4	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	27
5.5	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	30
5.6	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	32
5.7	Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	34
5.8	Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	36

5.9	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	39
5.10	Absolute median Beschleunigung Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie	41
5.11	Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	43
5.12	Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	45
5.13	Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	47
5.14	Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	49
5.15	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	52
5.16	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	55
5.17	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	57
5.18	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	59
5.19	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	61
5.20	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	64
5.21	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	66
5.22	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	68



5.23	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	70
5.24	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	72
5.25	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	74
5.26	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	76
5.27	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	79
5.28	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	81
5.29	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	83
5.30	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	86
5.31	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	89
5.32	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	91
5.33	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	93
5.34	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie . . . . .	95

# Tabellenverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	ii
4.1	Geräte . . . . .	10
4.2	Programme . . . . .	10
4.3	Probandengruppen (w = weiblich) . . . . .	11
4.4	Altersverteilung und anthropometrische Daten . . . . .	12
4.5	Qualisys Markerposition . . . . .	13
4.6	Sensorpositionen . . . . .	15
4.7	Versuchsprotokoll . . . . .	17
4.8	Auswertungsparameter . . . . .	17
5.2	Untergruppenvergleich Ganggeschwindigkeiten; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . .	21
5.3	Hauptgruppenvergleich Ganggeschwindigkeit; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . .	23
5.4	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	26
5.5	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	28
5.6	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	31
5.7	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	33

5.8	Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	35
5.9	Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	37
5.10	Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	40
5.11	Absolute median Beschleunigung Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	42
5.12	Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	44
5.13	Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	46
5.14	Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	48
5.15	Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	50
5.16	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	53
5.17	Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	56

5.18 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	58
5.19 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	60
5.20 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	62
5.21 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	65
5.22 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	67
5.23 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	69
5.24 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	71
5.25 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	73
5.26 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	75
5.27 Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	77

---

5.28	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	80
5.29	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen	82
5.30	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	84
5.31	Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen	87
5.32	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	90
5.33	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	92
5.34	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	94
5.35	Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen . . . . .	96

# Kapitel 1

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem dynamischen System der Kopf-Rumpf Koordination verschiedener Altersgruppen sowie Patienten mit einer bilateralen Vestibulopathie bei unterschiedlichen Ganggeschwindigkeiten und kognitivem Dual Task Paradigma. Ziel der Arbeit ist es zu untersuchen, in welcher Weise sich die Koordination in den Altersgruppen bei Gesunden sowie in der Gruppe der Patienten mit bilateraler Vestibulopathie (BVP) unterscheidet. Da sowohl das vestibuläre als auch das visuelle System direkt hiervon abhängig sind, kommt dieser Koordinationsleistung beim Gehen und der posturalen Kontrolle eine wichtige Funktion zu. Von besonderem Interesse ist es einerseits zu messen, ob bei allen Gruppen die Kopfbewegung bzw. die einwirkenden Kräfte sich ähneln und andererseits zu untersuchen, ob Hinweise auf kompensatorische Mechanismen zu finden sind.

Hierzu wurde zunächst eine geeignete Messmethode mittels marker-basiertem 3-D Motion Tracking und kombinierten Inertialsensoren etabliert sowie ein reliables Versuchsprotokoll definiert. Anschließend wurden für die unterschiedlichen gesunden Altersgruppen (20-40 Jahre, 40-60 Jahre, 60-80 Jahre) sowie für die Gruppe mit BVP, Probanden rekrutiert. Erfasst wurden hierbei die Rumpf-Kopf-Position, die Beschleunigung und die Drehgeschwindigkeit der Rumpf-/Kopfpartie.

Die vorliegende Arbeit konnte zeigen, dass Patienten mit einer BVP in Zusammenschau aller gemessenen Parameter sowie im Vergleich mit vorangegangenen Studien Kompensationsmechanismen entwickeln, um ihr sensorisches Defizit auszugleichen. Lediglich in wenigen Modalitäten lassen sich signifikante Unterschiede feststellen. Da diese Arbeit auch das Ziel hatte, Methoden zur Messung der Kopf-Rumpf-Stabilität neu zu etablieren, ergaben sich im Verlauf Erkenntnisse über die Optimierung verschiedener Parameter als Vorschläge zur Umsetzung in Folgeexperimente.

Das Verständnis für Kompensationsmechanismen, deren Trainierbarkeit bzw. Abschätzung der Entwicklung und somit Risikostratifizierung für z.B. Stürze sowie deren Folgen ist von essenziellem Interesse für die Lebensqualität der Patienten mit einer BVP und auch von gesundheitsökonomischer Bedeutung. Zudem lassen die Untersuchungen an die-

ser paradigmatischen Patientengruppe möglicherweise in Zukunft Rückschlüsse auf andere neurologische Erkrankungen mit vestibulär-sensorischen Defiziten zu. Die vorgestellte Methode könnte dann weitere Kompensationsmechanismen identifizieren, welche wiederum in spezifischen therapeutischen Trainings adressiert werden könnten.

# Kapitel 2

## Einleitung

Zunächst soll ein Überblick über die Systeme der posturalen Kontrolle sowie deren Zusammenspiel gegeben werden, um schließlich die Wichtigkeit der Kopf-Rumpf-Stabilität darzustellen.

### 2.1 Posturale Kontrolle

Die posturale Kontrolle, welche dem Menschen den aufrechten Gang ermöglicht, ist unter anderem durch eine ständige Rückkopplung sensorischer Informationen aus visuellem- (Berthoz et al., 1979; Bronstein, 1986; Dijkstra et al., 1994; Lee und Lishman, 1975), vestibulären- (Day et al., 1997; Hlavacka und Njiokiktjien, 1985; Nashner und Wolfson, 1974) und propriozeptivem System (Allum, 1983; Jeka et al., 1997; Kavounoudias et al., 1999) sowie der integrativen Leistung des zentralen Nervensystems gegeben (Johansson und Magnusson, 1991). Diese integrierten Informationen werden für korrektive Bewegungen genutzt, welche den Kopf mit einer Genauigkeit von wenigen Grad im Raum stabilisieren (Pozzo et al., 1990). Da dem System nicht zu jederzeit alle sensorischen Informationen gleichwertig zur Verfügung stehen (z.B. in Dunkelheit, bei geschlossenen Augen oder beim Gehen auf unebenem Grund), müssen Kompensationsmechanismen existieren, welche trotz unterschiedlicher Qualitäten der sensorischen Informationen eine sichere posturale Kontrolle ermöglichen (Bolton, 2015). Dass das System eine hohe Flexibilität aufweist, zeigen z.B. Patienten mit einer BVP, bei denen beide Gleichgewichtsorgane ausgefallen sind, die jedoch weiterhin Stehen und Gehen können (Schneider et al., 2002). Hervorzuheben ist, dass selbst gesunde Personen einem Alterseffekt unterliegen, welcher zu einer Verschlechterung der posturalen Stabilität aufgrund abnehmender sensorischer Informationen bzw. integrativer



Leistungen führt und mit einem erhöhten Risiko für Stürze einhergeht (Sieńko-Awierianów et al., 2018).

### **2.1.1 Sensorische Systeme**

Verschiedene sensorische Systeme liefern Informationen aus der Umwelt sowie zum aktuellen Zustand des Körpers, um die posturale Kontrolle und Bewegung zu ermöglichen. Die einzelnen Systeme sollen im Folgenden vorgestellt und Einflüsse diskutiert werden.

#### **Visuell**

Die visuelle Stabilisierung der posturalen Kontrolle wird durch die Detektion der Verschiebung des retinalen Zieles bei Kopfbewegungen erreicht (Straube et al., 1990). Hierbei wird die visuelle Information vor allem bei der Kompensation von Körperbewegungen unter 1 Hz herangezogen (Dichgans und Brandt, 1978; Diener und Dichgans, 1988; Fitzpatrick und McCloskey, 1994). In der klinischen Testung ist ein einfacher Test, der den Einfluss des visuellen Systems auf die posturale Kontrolle zeigt, der Romberg-Test. Bei diesem kommt es zu einer Zunahme der Schwankung bei geschlossenen Augen, wenn diese zur Kompensation andersgearteter Ausfälle herangezogen werden. Aber auch bereits bei gesunden Probanden ist hier eine Zunahme der Körperschwankung zu beobachten (Schmid et al., 2008; Strupp et al., 1999). Die Bedeutung der visuellen Kompensation zeigt sich auch bei Beeinträchtigung der Sehkraft aufgrund natürlicher Alterungserscheinungen, welche einen direkten Einfluss auf die Körperschwankung hat und zu einer Destabilisierung führen kann (Winter et al., 1996).

#### **Propriozeptiv**

Das propriozeptive System besteht aus unterschiedlichen mechanischen Sensoren. Muskelspindeln nehmen hierbei die Geschwindigkeit und Längenänderung bei Bewegung wahr. Golgi-Organen, welche in den Muskelsehnen lokalisiert sind, registrieren die erzeugte Spannung der Muskeln. Die Information über die Orientierung der unteren Extremität sowie der Sprunggelenke ist hierbei für die posturale Kontrolle besonders wichtig (Roll et al., 1989) (Proske und Gandevia, 2012). Die mechanischen Rezeptoren der Haut spielen wahrscheinlich eine untergeordnete Rolle und werden bei geringen Frequenzen der Körperschwankung integriert (Dietz et al., 1980).

**Nackenrezeptoren** Die Mechanorezeptoren des Nackens als spezielle Unterform der propriozeptiven Sensoren haben wichtige Verbindungen mit dem vestibulären- und visuellen System sowie mehreren Regionen des zentralen Nervensystems. Diese Verbindungen erklären den Einfluss auf die posturale Stabilität. Insbesondere spielen sie bei der Kontrolle der posturalen Orientierung im Raum und der Erkennung von Bewegung eine wichtige Rolle (Pettorossi und Schieppati, 2014; Treleaven, 2008).

## Vestibulär

Das vestibuläre System ist sowohl bei der motorischen Kontrolle als auch der Wahrnehmung der räumlichen Bewegung des Körpers beteiligt (Dieterich und Brandt, 2015; St George und Fitzpatrick, 2011). Hierbei setzt sich das System aus dem Vestibularorgan (Vgl. Abb.2.1) und seinen weiteren Verschaltungen in den vestibulären Kerngebieten zusammen. Die Afferenzen aus den Otolith- und den Bogengangorganen summieren sich mit optokinetischen, somatosensorischen sowie motorischen Signalen in den vestibulären Kerngebieten und werden reziprok mit dem vestibulär-zerebellärem Kortex sowie zerebellären Kernen verschaltet (Green und Angelaki, 2010).

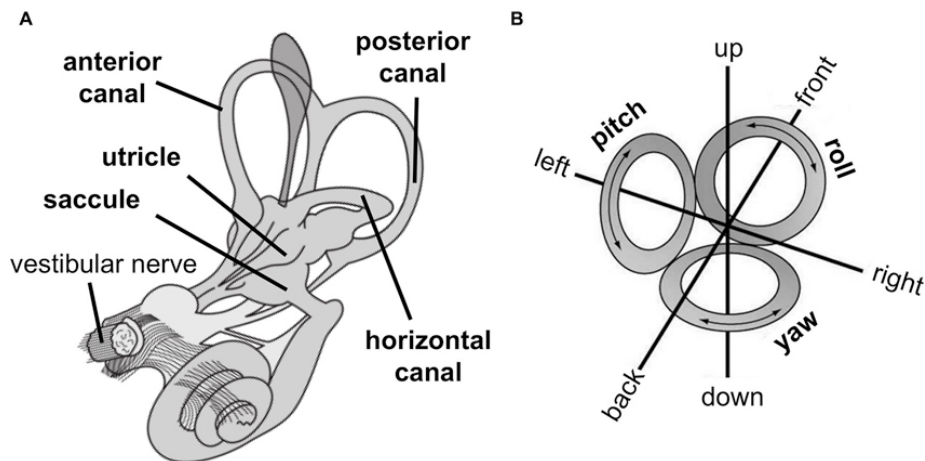


Abbildung 2.1: Model Vestibularorgan nach (Pfeiffer et al., 2014) (abgewandelt nach NASA Abbildungen)

### 2.1.2 Integration der sensorischen Informationen

Wie beschrieben, werden diverse sensorische Informationen für die posturale Kontrolle verwendet. Bei dieser Menge an unterschiedlichen Informationen ist ihre sinnvolle Verarbeitung essenziell. Die Integration der sensorischen Information erzeugt ein internes Modell

der Position und Bewegung des Körpers. Dabei laufen diese über das Rückenmark, die vestibulären Kerngebiete, Hirnstamm, Thalamus, Zerebellum sowie den Kortex (Manzoni, 2007) zusammen. So muss z.B. die propriozeptive mit der visuellen und vestibulären Information verschaltet werden, um komplexe Umgebungen interpretieren zu können. In einer hellen Umgebung und bei sicherem Untergrund verlassen sich gesunde Personen vor allem auf das somatosensorische und weniger auf das vestibuläre oder visuelle System (Peterka, 2002). Kommt es zu einem Ausfall eines sensorischen Systems, erlaubt deren Redundanz Kompensationen. Sollte diese Kompensation jedoch nicht ausreichen, kann die posturale Stabilität gestört werden und die Wahrscheinlichkeit für Stürze steigt. Die Bereiche des parietalen-, temporalen- und insulären Kortex sind für die sensorische Integration während posturaler Vorgänge besonders wichtig. Sie sind an der Anpassung der posturalen Antwort bei Veränderungen des kognitiven Status oder initialen sensomotorischen Bedingungen beteiligt, wenn bereits vorher Erfahrungen mit einer Situation gesammelt wurden (Horak et al., 1989; Jacobs und Horak, 2007). Die zerebellär-kortikale Schleife scheint ebenso verantwortlich zu sein für die Adaptation der posturalen Antwort auf Basis von früheren Erfahrungen (Horak und Diener, 1994). Wohingegen die Basalganglien-Kortex Schleife wiederum bei der Optimierung der posturalen Antwort im Bezug auf den aktuellen Kontext eine wichtige Rolle spielt (Bloem et al., 1995; Schieppati und Nardone, 1991). Mehrere Studien konnten auch zeigen, dass die kognitive Leistung abnimmt, wenn gleichzeitig eine komplexere posturale Aufgabe gefordert wird (Teasdale und Simoneau, 2001).

### **Feedback und Feed Forward Modell der posturalen Stabilität**

Dem zentralen Nervensystem werden Abweichungen des Gleichgewichts über sensorische Informationen sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich bereitgestellt (Massion, 1992). Die kontinuierliche Information wird beim einfachen Stehen und unvorhersehbaren kontinuierlichen Perturbationen des Untergrundes verwendet (van der Kooij und de Vlugt, 2007). In Studien zeigte sich diesbezüglich aber auch, dass beim einfachen Stehen zunächst nicht immer Feedback zur posturalen Kontrolle verwendet wird. Wenn zu Beginn kein Feedback vorhanden ist bzw. die Information nicht ausreicht, wird eine open-loop Kontrolle d.h. Steuerung durch eine vorgegebene Befehlskette, ohne Berücksichtigung von Feedback oder sensorischer Information angewandt. (Chiari et al., 2000; Collins und De Luca, 1993). Nach ungefähr einer Sekunde ändert sich der Kontrollmechanismus dann schließlich von open-loop zu closed-loop und es wird ein kontinuierliches Feedback zur posturalen Kontrolle herangezogen. Das diskontinuierliche Feedback spielt eine Rolle, wenn die postura-

le Stabilität durch äußere Einwirkung plötzlich gestört wird, z.B. eine externe Kraft auf den Körper einwirkt und ihn so aus seinem Gleichgewicht bringt (Horak und Nashner, 1986). Zur Modellierung der posturalen Kontrolle im Feedback bzw. Feedforward Modell des Körpers eines Menschen hat sich das inverse Pendel mit einem Drehpunkt an den Knöcheln (Knöchel-Strategie) als mathematische Beschreibung bewährt (Maurer et al., 2006; Peterka, 2002; Peterka et al., 2011). Die Integration der sensorischen Information erfolgt hierbei im Model über einen Feedbackmechanismus, wie in Abbildung 2.2 gezeigt. (Mergner et al., 2002,0; Mergner und Peterka, 2016; Peterka, 2002; Peterka und Loughlin, 2004). Weiter wird auch ein System aus zwei Pendeln, welche über die Hüfte verbunden sind, herangezogen. Dies stellt eine weitere Balance-Strategie (Hüft-Strategie) dar (Horak und Nashner, 1986).

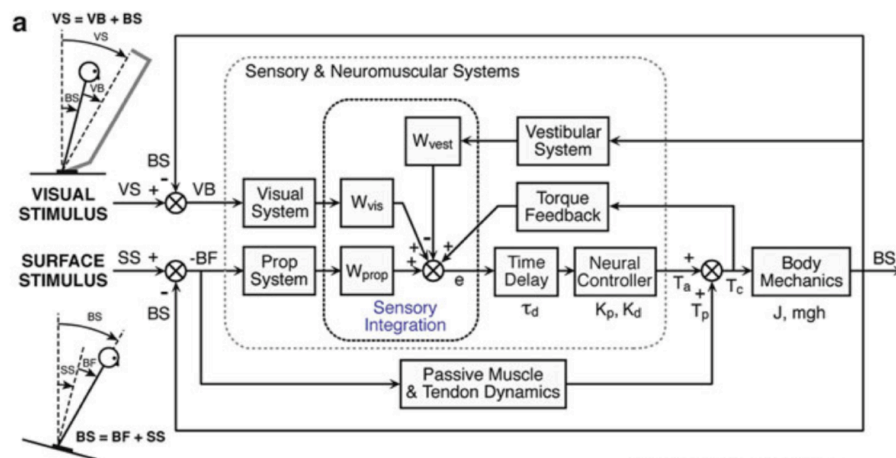


Abbildung 2.2: Feedback Modell nach Peterka et al. (2011)

## 2.2 Geschwindigkeitsabhängigkeit

Ein weiterer Aspekt, der in dieser Arbeit untersucht werden soll, ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kopf-Rumpf Stabilisation. Wie bereits Schniepp et al. (2012) zeigen konnten, hat die Ganggeschwindigkeit Einfluss auf die Gangvariabilität, sowohl bei zerebellären Erkrankungen, integrativen Störungen als auch primären vestibulären Defiziten. Somit hat möglicherweise auch die Ganggeschwindigkeit einen Einfluss auf die Rumpf-Kopf Stabilisierung. Weiter konnten Dietrich et al. (2020) zeigen, dass bei zunehmender Ganggeschwindigkeit vermehrt automatische Motorprogramme bei der Kopfbewegung herangezogen werden und das vestibuläre Feedback zum Teil ausgeblendet wird. So ist es vorstellbar,

dass alternative Kompensationsmechanismen durch Veränderung der Ganggeschwindigkeit identifiziert werden können.

## 2.3 Posturale Kontrolle und kognitive Dual Task Paradigmen

Wie bereits beschrieben konnten Teasdale und Simoneau (2001) zeigen, dass bei komplexen posturalen Aufgaben die kognitive Leistung von Probanden abnimmt. Hier stellt sich im Umkehrschluss die Frage, ob sich eine explizit komplexe kognitive Aufgabe, welche priorisiert durchgeführt wird, auf die posturale Kontrolle auswirkt. Schmid et al. (2007) konnten hierzu zeigen, dass bereits bei Kindern eine zusätzliche kognitive Beanspruchung zu einer signifikanten Änderung der posturalen Kontrolle mit Zunahme des Bewegungsumfanges des Center-of-Pressure (COP), welcher den Balancemittelpunkt darstellt, als auch zu einer breiteren Frequenzdomäne führt. Bezüglich der Veränderungen der posturalen Kontrolle konnten Melzer et al. (2001) zeigen, dass im Vergleich zu jüngeren Gruppen die posturale Schwankung bei älteren Menschen sowohl für Single- als auch Dual-Task Bedingungen erhöht ist. Interessanterweise zeigte sich bei zusätzlich schmaler Standbreite für die ältere Gruppe eine reduzierte posturale Schwankung im Vergleich zur jüngeren Kontrollgruppe. Elektromyographisch konnte hier eine Aktivierung des M. tibialis anterior sowie M. soleus erfasst werden. Somit kommt es zu einer Stabilisierung im Sprunggelenk und damit zu einer Veränderung des posturalen Kompensationsmodells, wie es in Abschnitt 2.1.2 beschrieben wird.

## 2.4 Kopf-Rumpf-Stabilität

Die Kopf-Rumpf-Stabilität spielt eine zentrale Rolle bei der posturalen Kontrolle, da sie direkt auf zwei beteiligte sensorische Systeme, das vestibuläre und das visuelle, aufgrund deren Lokalisierung am Kopf Auswirkungen hat. Hierzu reagiert das dynamische System des Oberkörpers und Kopfes auf weitere Körperbewegungen, um ein Abweichen dieser Körperpartien relativ zur Gesamtbewegung zu minimieren (Cromwell et al., 2001a,0,0). Dies zeigt sich sowohl in einer geringeren Beschleunigungsamplitude im Vergleich zum unteren Körperstamm (Kavanagh et al., 2005a; Menz et al., 2003) als auch in einer geringeren Oszillationen bei Bewegung (Cappozzo, 1981; Holt et al., 1999; Ratcliffe und Holt, 1997). Somit können die beiden sensorischen Systeme im Raum referenzieren und

verlässliche Daten zur Integration der Körperlage und Bewegung liefern. Die Dynamik der Kopf-Rumpf-Stabilität spielt damit auch eine direkte Rolle bei der Blickstabilisation (Holt et al., 1999; Pozzo et al., 1990) und hat eine wichtige Aufgabe im Falle einer Einschränkung der vestibulären Funktion (Wei et al., 2016).

Cromwell et al. (2001a) konnten bereits zeigen, dass der Oberkörper eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung des Kopf, Hals und Rumpfes während des Gehens hat, wobei sich der Rumpf als stabilstes Segment herausstellte. Das Rumpfsegment dient hierbei als hauptsächliches Dämpfungselement für den Kopf, wie bei (Kavanagh et al., 2006) demonstriert werden konnte. Weiter konnte (Kavanagh et al., 2005b) zeigen, dass die auf den Kopf einwirkenden Beschleunigungen nicht altersabhängig sind. Als Kompensationsmechanismus konnte eine ausgeprägte Koordinierungsstrategie des Rumpfes ausgemacht werden, welche die Dämpfung zu den übrigen Körperregionen kompensatorisch auch bei Abnahme der biomechanischen Leistung im Alter verbesserte.

## 2.5 Stürze

Die klinische und alltägliche Relevanz der Kopf-Rumpf-Stabilität ergibt sich aus dem Zusammenhang der Auswirkung auf die posturale Kontrolle und dem hiermit vorhandenen Einfluss auf das Risiko für Stürze bei deren Beeinträchtigung. Insbesondere gilt dies auch bei zunehmendem Alter (Horak, 2006). Stürze sind im Allgemeinen eine häufige Ursache für Einschränkungen im Alter. Auch zeigen aktuelle Daten aus Amerika, dass die Inzidenz tödlicher Stürze bei 59.64 pro 100.000 Einwohner liegt und somit einen nicht zu verachtenden Anteil der Mortalität darstellt (Florence et al., 2018). Hauer et al. (2003) konnten veranschaulichen, dass die Beeinträchtigung der kognitiven Funktion, wie sie auch im natürlichen Alterungsprozess vorkommt, zu einer Verschlechterung der posturalen Stabilität und somit auch zu Stürzen führt. Dies gilt insbesondere für Situationen, bei denen gleichzeitig kognitive Aufgaben, auch wenn diese einfacher Natur sind, die volle Konzentration auf die Bewegung einschränken. In Studien, die sich explizit mit Alterserscheinungen und posturaler Kontrolle beschäftigten, stellt sich z.B. heraus, dass auch eine Priorisierung des visuellen Systems für die Kopfstabilität bei Verschlechterung der anderweitigen sensorischen Informationen (z.B. Propriozeption bei Polyneuropathie) erfolgt (Cromwell et al., 2002). Ebenso zeigt eine Betrachtung der Kosten für das Gesundheitssystem, welche durch Stürze und deren Folgen entstehen, die hohe Relevanz der Untersuchungen, die sich mit posturaler Kontrolle und der daraus erhöhten Gefahr für Stürze beschäftigen. Nach neueren

---

Studien entstanden in Amerika 2015 aufgrund von Stürzen unterschiedlicher Schweregrade Gesamtkosten von rund 50 Milliarden US-Dollar (Florence et al., 2018). Aber nicht nur das Alter kann zu einer Beeinträchtigung der posturalen Kontrolle und somit zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Stürze führen. Es konnte bereits gezeigt werden, dass z.B. auch Parkinson Patienten mit gestörter Kopf-/Rumpfstabilität ein höheres Sturzrisiko haben (Cole et al., 2010). Bei Patienten mit einer unilateralen Vestibulopathie wiederum besteht eine sehr gute Kompensation, sodass kein Unterschied bezüglich der Kopf-Translation im Vergleich zu Gesunden gezeigt werden konnte. Dies gilt jedoch nicht für Patienten mit einer BVP, welche eine eingeschränkte Kopf-Translation bei gleichzeitig beschleunigter Blickgeschwindigkeit aufweisen (Crane und Demer, 2000).

# Kapitel 3

## Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, eine geeignete Methode zu entwickeln, um die Rumpf-Kopf-Koordination zu quantifizieren. In einem zweiten Schritt werden Messungen bei Gesunden verschiedenen Alters und einer BVP-Gruppe jeweils bei verschiedenen Bedingungen durchgeführt, um Unterschiede der Gruppen bezüglich der Rumpf-Kopf-Koordination aufzuzeigen.

Die folgenden Ziele haben wir definiert:

- I) Evaluation der Möglichkeiten zur Untersuchung der Rumpf-Kopf-Koordination sowie Messung der absoluten / relativen Bewegung, Beschleunigung und Rotationsgeschwindigkeit**
- II) Setup und Installation der Versuchsanordnung**
- III) Festlegung eines Versuchsprotokolls zur reliablen Messung im Hinblick auf Alter, Ganggeschwindigkeit sowie kognitiver Beanspruchung**
- IV) Analyse der erhobenen Daten mit Korrelation zu Alter, Ganggeschwindigkeit, kognitiver Beanspruchung und sensorischem Defizit**



# Kapitel 4

## Material und Methoden

### 4.1 Hilfsmittel

**Tabelle 4.1:** Geräte

Verwendung	Bezeichnung	Hersteller
3D Marker Motion Tracking	Oqus	Qualisys
Computer, 3D Capturing	Vostro	Dell
Inertial Measurement Units	Mobility Lab V1	APDM
Synchronisation	Raspberry Pi 1	Raspberry Pi Foundation

**Tabelle 4.2:** Programme

Name	Version	Hersteller
Qualisys Track Manager (QTM)	2015	Qualisys
Motion Studio	1.0.0	APDM
Windows	7	Microsoft
R Statistics	3.6.1	R Core Team
RStudio	1.2.1335	RStudio Inc
Texpad	1.8.11	Valletta Ventures

## 4.2 Studienteilnehmer

### 4.2.1 Ethische Richtlinien

Für die Studie liegt ein Ethikvotum der LMU vor. Die Probanden wurden über die Absichten der Studie aufgeklärt, die Prozedur erläutert und mit einem Probandengeld vergütet (20,- Euro pauschal).

### 4.2.2 Charakterisierung der Probanden

Die Rekrutierung der Probanden erfolgte über das Deutsche Schwindel- und Gleichgewichtszentrum (DSGZ) des Klinikums der Universität München (Campus Großhadern, Marchioninistraße 15, 81377 München). Die Probandenkohorte setzt sich aus 29 Probanden in vier Gruppen zusammen. Die Einschlusskriterien sind entsprechend der Gruppe aus der Tabelle 4.3 zu entnehmen. Ausschlusskriterien waren bekannte andere neurologische Erkrankungen. Die BVP Probanden wurden aus den bereits im DSGZ klinisch-neurologisch vordiagnostizierten Patienten rekrutiert. Dort erhielten diese bis zur endgültigen Diagnose sowohl eine klinisch-neurologische Untersuchung durch einen Arzt als auch apparative Diagnostik (kalorische Messung, Video-Head-Impuls Testung). Die Diagnose war nach den zum Rekrutierungszeitpunkt gültigen Kriterien definiert als:

- bewegungsabhängiger Schwankschwindel und Gangunsicherheit, verstärkt in Dunkelheit und auf unebenem Untergrund sowie Oszillopsien bei raschen Kopfbewegungen und beim Gehen.
- beidseits pathologischer Kopfpulstest und/oder kalorische Unerregbarkeit

**Tabelle 4.3:** Probandengruppen (w = weiblich)

Gruppe Nr.	Bezeichnung	Anzahl
1	20.-40. Lebensjahr	10 (w=5)
2	40.-60. Lebensjahr	8 (w=7)
3	60.-80. Lebensjahr	6 (w=3)
4	Bilaterale Vestibulopathie	5 (w=3)

**Tabelle 4.4:** Altersverteilung und anthropometrische Daten

Gruppe Nr.	Alter	Körpergröße (cm)	Gewicht (kg)
1	35.4±28.2	174.1±7.5	72.9±12.5
2	51.5±4.7	169.8±9.1	72.9±15.9
3	67.3±5.8	168.7±7.8	69.3±7.8
4	43.8±25.7	175.8±9.8	69.4±11.5

### 4.3 3D Motion Tracking

Ein marker-basiertes Motion-Trackingsystem, wie das hier verwendete System von Qualisys, erfasst mittels infrarotsensitiver Kameras am Körper des Probanden angebrachte Marker und berechnet hieraus deren relative Position im Raum zu einem zu Beginn festgelegten Bezugspunkt. Hierbei kommen Marker zum Einsatz welche insbesondere das Infrarotlicht der um die Kamera angebrachten Infrarotstrahlern reflektieren. So erhält jede Kamera, welche den Marker unbedeckt erfassen kann, eine 2-dimensionale Projektion des Markers. Erfassen nun mindestens 2 Kameras diesen Marker können über Berechnungen 3-D-Koordinaten des Markers im Raum bestimmt werden. Hierzu werden die erfassten Daten jeder Kamera über ein Netzwerk an einen zentralen Computer übertragen und im Qualisys-Tracking-Manager zusammengeführt. Die Software bietet die Möglichkeit, die erfassten Marker miteinander in Relation zu setzen und spatiale- sowie temporale Parameter zu bestimmen. Die Abtastrate liegt hierbei bei 138Hz.

#### 4.3.1 Marker Position

Ziel der Marker Positionierung ist es, sowohl die relative Position zum Inertialsystem als auch die Rotation des Kopfes und Rumpfes unabhängig voneinander zu messen. Hierzu müssen für jede Partie (Kopf / Rumpf) jeweils mindestens 3-Marker angebracht werden, um ein Bezugssystem mit x-,y- und z-Achse aufzuspannen. Da je nach Position des Probanden in der Testumgebung nicht alle Marker aufgrund von Verdeckung durch Körperpartien sichtbar sind, wurden weitere redundante Marker (Tab. 4.5 9-11) definiert, um eine optimale Abdeckung in allen Positionen zu erreichen. Zur eindeutigen Positionierung der Marker am Kopf wurde die Reids Plane verwendet, welche sich über von außen sichtbare anatomische Landmarken (Tab. 4.5 Nr. 1-4 s.h. Schneider et al. (2002) ) definiert Blanks et al. (1975).

Die Rumpfebene wird über die Marker Tab. 4.5 5-8 bestimmt.

**Tabelle 4.5:** Qualisys Markerposition

Marker Nr.	Position
1	unterer Rand Orbita, mittig, rechts
2	unterer Rand Orbita, mittig, links
3	Tragus, mittig auditorsicher Kanal, rechts
4	Tragus, mittig auditorischer Kanal, links
5	C7
6	Acromium rechts
7	Acromium links
8	Incisura jugularis Sternum
9	TH4
10	Saggitalebene vorne
11	Saggitalebene, Inion

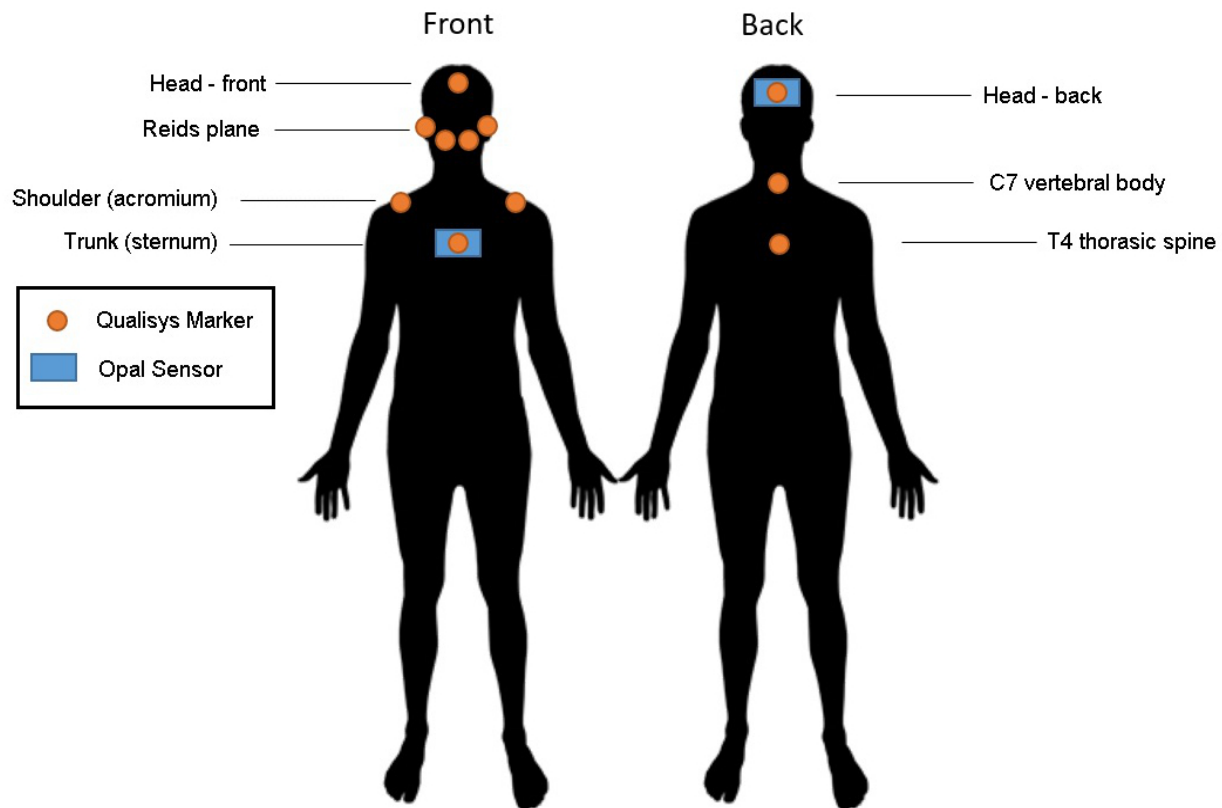


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Marker- / Sensorpositionen

## 4.4 Inertial Messeinheit

Die MobilityLab Sensoren stellen inertielle Messeinheiten (IMU, inertial measurement unit) dar. Diese messen die Beschleunigung und Rotationsgeschwindigkeit basierend auf mehreren Beschleunigungssensoren für die x- bzw. y- bzw. z-Achse sowie den orthogonal angebrachten Drehratsensoren (Gyroskope). Zur Verbesserung der Genauigkeit kommen zusätzlich Magnetfeldsensoren für interne Korrekturberechnungen zum Einsatz. Die zeitliche Auflösung liegt bei 128Hz. Eine IMU Einheit kann somit physikalische Größen, welche auch durch das Vestibularorgan registriert werden, erfassen. Hierbei misst dieses ebenfalls rotatorische Bewegung in drei Achsen (Roll, Pitch, Yaw) mittels einer trägen Flüssigkeit, welche Haarzellen auslenkt, die wiederum einen elektrischen Impuls erzeugen. Analog hierzu kann technisch die Winkelgeschwindigkeit ( $deg^\circ/s$ ) mittels Gyroskop bestimmt werden. Weiter misst das Vestibularorgan durch Sacculus und Utriculus die vertikale und horizontale Beschleunigung, welche technisch analog mit einem Beschleunigungssensor ( $m/s^2$ ) gemessen werden

kann. Somit können die sensorischen Qualitäten des Vestibularorgans mithilfe physikalisch-/technischer Sensoren abgebildet werden Rabbitt et al. (2004). Ein grafisches Beispiel der gewonnenen Daten findet sich in Abbildung 4.2

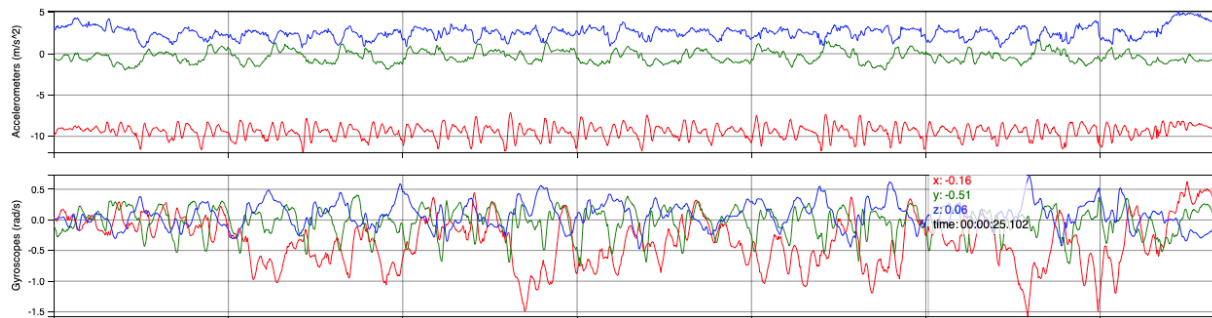


Abbildung 4.2: Beispieldatensatz einer einzelnen IMU Einheit mit Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit

#### 4.4.1 Sensorposition

Zur unabhängigen Erfassung des Kopfes und Rumpfes müssen zwei IMU MobilityLab Sensoren an einer definierten Stelle, wie in Tabelle 4.6 beschrieben, angebracht werden.

**Tabelle 4.6:** Sensorpositionen

Marker Nr.	Position
1	Saggitalebene, Inion
2	Incisura jugularis Sternum

## 4.5 Synchronisation der Geräte

Zur Synchronisation der Messgeräte wird das Qualisys-Motion-Tracking-System als Master und das MobilityLab-System als Slave betrieben. Das Synchronisationssignal des Masters ist hierbei eine negative TTL Flanke. Da das Qualisys System vor jeder Messung zur Initialisierung bereits ein vorzeitiges Signal sendet, welches bei direkter Verbindung zum Slave einen sofortigen Beginn der Aufnahme zur Folge hat, wird ein Raspberry Pi mit einer C++ Software zwischengeschaltet, der als Signalübersetzer fungiert. Ein vollständiger Versuchsaufbau ist in der Abbildung 4.3 zu sehen.

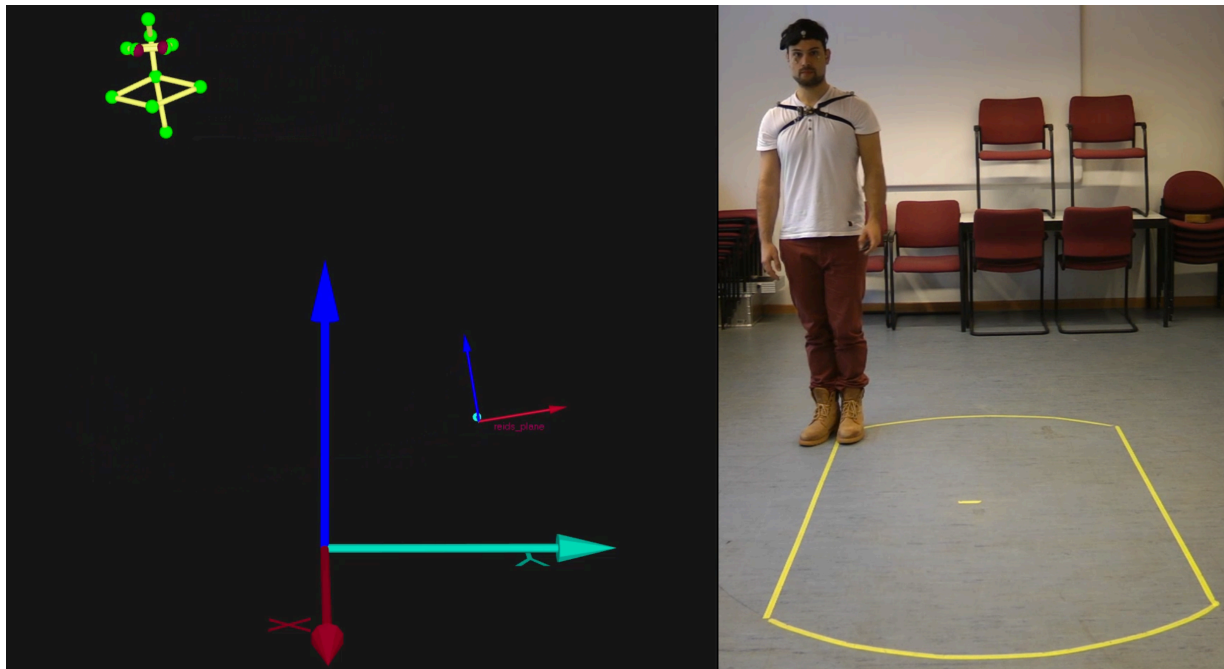


Abbildung 4.3: RGB Kamerabild (rechts), Qualisys Marker Repräsentation in der 3D Software (links)

## 4.6 Versuchsprotokoll

Zur standardisierten Durchführung des Experimentes wurde ein Versuchsprotokoll festgelegt. Hierbei wurden, wie in der Einleitung beschrieben, sowohl Geschwindigkeitsmodalitäten als auch ein kognitiver Dual Task berücksichtigt. Aufgrund beschränkter Platzverhältnisse und einem eingeschränkten Erfassungswinkel der Kameras wurde der zu gehende Weg als Rundkurs mit geraden und radialen Anteilen gewählt.

Tabelle 4.7: Versuchsprotokoll

Nr.	Aufgabe	Messsystem
1	selbstgewählte Ganggeschwindigkeit, 2 Bahnen, beliebige Kopfposition	Qualisys, MobilityLab
2	selbstgewählte langsame Ganggeschwindigkeit, 2 Bahnen, beliebige Kopfposition	Qualisys, MobilityLab
3	selbstgewählte schnelle Ganggeschwindigkeit, 2 Bahnen, beliebige Kopfposition	Qualisys, MobilityLab
4	selbstgewählte Ganggeschwindigkeit, Serial-7 Dual Task, 2 Bahnen, beliebige Kopfposition	Qualisys, MobilityLab

## 4.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software R-Statistics (s.h. Tabelle 4.2). Zum Einlesen der Daten aus dem MobilityLab Studio (H5 Format) sowie dem Qualisys Motion Tracker (Matlab Format) wurden entsprechende Bibliotheken eingebunden.

Die betrachteten Parameter aus der Analyse sind der Tabelle 4.8 zu entnehmen.

Tabelle 4.8: Auswertungsparameter

MobilityLab Sensor	Parameter	Einheit	Methode
Kopf	Beschleunigung	$(m/s^2)$	Median
Rumpf	Beschleunigung	$(m/s^2)$	Median
Kopf/Rumpf Differenz	Beschleunigung	$(m/s^2)$	Median
Qualisys System	Parameter	Einheit	Methode
Rumpf Marker	Ganggeschwindigkeit	(m/s)	Median
Reids Plane	Bewegungsumfang	(Grad °)	Median
Rumpf-Kopf Marker	Bewegungsumfang	(cm)	Median

Es wird generell der Median-Wert über die Zeitserie der Messungen gewählt, um eine Robustheit gegen Ausreißer in den Messreihen zu gewährleisten. Diese können z.B. bei den



MobilityLab Sensoren durch leichtes Verrutschen auftreten und aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung zu einer unabsichtlichen Abweichung der Messdaten führen. Das Gleiche gilt für die Messdaten des Qualisys-Systems. Auch hier wird eine hohe zeitliche Auflösung gewählt. Durch Verdeckung der Marker kann es zu einem plötzlichen Versatz der Marker im abgeleiteten Modell der QTM Software kommen, da diese im Hintergrund mit Algorithmen zur Glättung von fehlenden oder falsch gemessenen Markern arbeitet. Aufgrund der unterschiedlichen Abstraten der zwei Systeme wurden die Qualisys Daten ebenfalls auf 128Hz resampled. Zur Signifikanzberechnung wird bei nicht-gepaarten Stichproben mit inkonstanter Normalverteilung ein Wilcoxon-Mann-Whitney-Test für ein Signifikanzlevel von  $\alpha = 0.05$  durchgeführt. Die Grundvoraussetzung der Normalverteilung der Gruppenmesswerte wird hierbei mittels eines Shapiro-Wilk-Tests berechnet (p-Wert). Hier gilt ebenfalls ein Signifikanzlevel von  $\alpha = 0.05$ . Zur Vermeidung systematischer Fehler in der Messung, z.B. durch leichte Abweichungen der Positionierung der Sensoren, werden die Zeitreihen mithilfe von Mittelwertzentrierung korrigiert, sodass diese um ihren Mittelwert oszillieren (Mean-centering). Anschließend werden diese mittels Betragsfunktion ( $|x|$ ) auf den Zahlenraum der nicht negativen reellen Zahlen beschränkt ( $\mathbb{R}_{>0}$ ). Zur strukturierten Auswertung werden zunächst die Untergruppen und anschließend die zwei Hauptgruppen (Kontrollgruppe vs. BVP), jeweils mit und ohne Geschwindigkeitskorrelation betrachtet. Aufgrund der Vielzahl der gemessenen Modalitäten wurden die einzelnen Parameter für jede Achse getrennt analysiert. Zur Darstellung kommt hierbei ein Boxplot mit dem Median als horizontale Linie, der Quartilen-Box, welche die mittleren 50% der Daten repräsentiert, sowie den Whiskern, welche die unteren und oberen 25% der Daten ohne Ausreißer anzeigen.

# Kapitel 5

## Ergebnisse

Die folgenden Abbildungen beziehen sich jeweils auf die definierten Gruppen:

Gruppe Nr.	Bezeichnung
1	20.-40. Lebensjahr
2	40.-60. Lebensjahr
3	60.-80. Lebensjahr
4	Bilaterale Vestibulopathie

## 5.1 Ganggeschwindigkeiten

### 5.1.1 Untergruppenvergleich

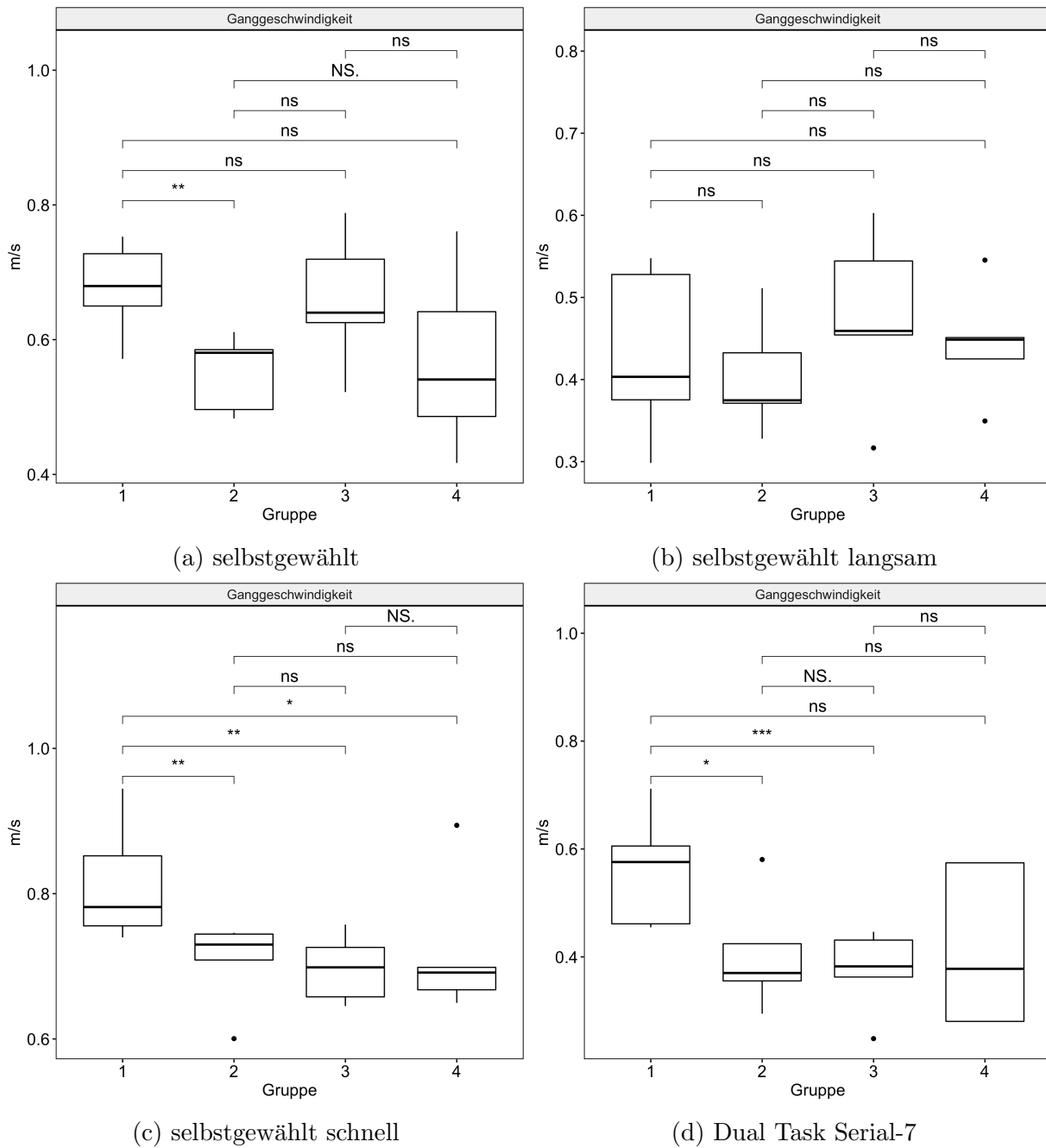


Abbildung 5.1: Untergruppenvergleich Ganggeschwindigkeiten; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.683	0.06	0.494	1	0.427	0.092	0.216
2	0.551	0.058	0.215	2	0.403	0.071	0.61
3	0.659	0.101	0.942	3	0.475	0.108	0.792
4	0.569	0.135	0.887	4	0.444	0.07	0.725

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.816	0.078	0.083	1	0.555	0.089	0.331
2	0.706	0.061	0.03	2	0.405	0.108	0.454
3	0.697	0.047	0.748	3	0.374	0.078	0.392
4	0.72	0.099	0.021	4	0.417	0.149	0.085

Tabelle 5.2: Untergruppenvergleich Ganggeschwindigkeiten; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Signifikante Unterschiede zeigen sich beim selbst gewählten Gehen der Gruppe 1 ( $0.683 \pm 0.06$  [m/s]) mit einer höheren Ganggeschwindigkeit im Vergleich zur Gruppe 2 ( $0.551 \pm 0.058$  [m/s]). Beim schnellen, selbst gewählten Gehen für die Gruppe 1 ( $0.816 \pm 0.078$  [m/s]) mit einer schnelleren Ganggeschwindigkeit im Vergleich zur Gruppe 2 ( $0.706 \pm 0.061$  [m/s]), Gruppe 3 ( $0.697 \pm 0.047$  [m/s]) und 4 ( $0.72 \pm 0.099$  [m/s]). Für die Dualtask Bedingung findet sich ebenfalls eine höhere Ganggeschwindigkeit in der Gruppe 1 ( $0.555 \pm 0.089$  [m/s]) im Vergleich zu den Gruppen 2 ( $0.405 \pm 0.108$  [m/s]) und 3 ( $0.374 \pm 0.078$  [m/s]).

## 5.1.2 Kontrollgruppe vs. BVP-Gruppe

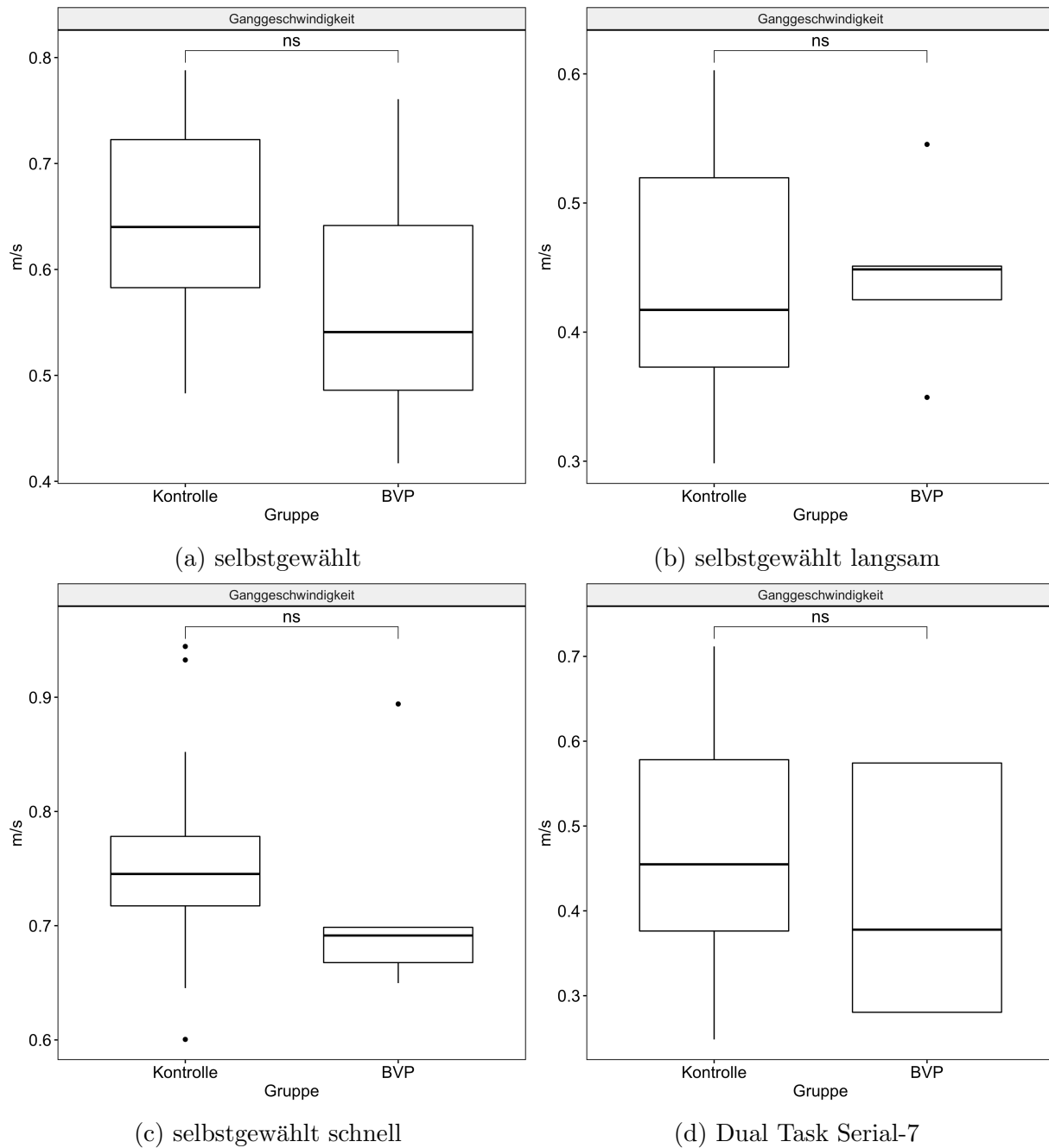


Abbildung 5.2: Hauptgruppenvergleich Ganggeschwindigkeit; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.642	0.088	0.702	1	0.433	0.091	0.318
4	0.569	0.135	0.887	4	0.444	0.07	0.725

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.756	0.086	0.187	1	0.468	0.122	0.828
4	0.72	0.099	0.021	4	0.417	0.149	0.085

Tabelle 5.3: Hauptgruppenvergleich Ganggeschwindigkeit; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen zeigen sich hier für keine der Bedingungen. Tendenziell zeigt sich jedoch eine geringere Ganggeschwindigkeit der BVP-Gruppe für das selbstgewählte- und schnelle Gehen sowie beim Gehen während der Dual-Task Serial-7 Aufgabe.



## 5.2 Beschleunigung

### 5.2.1 IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich

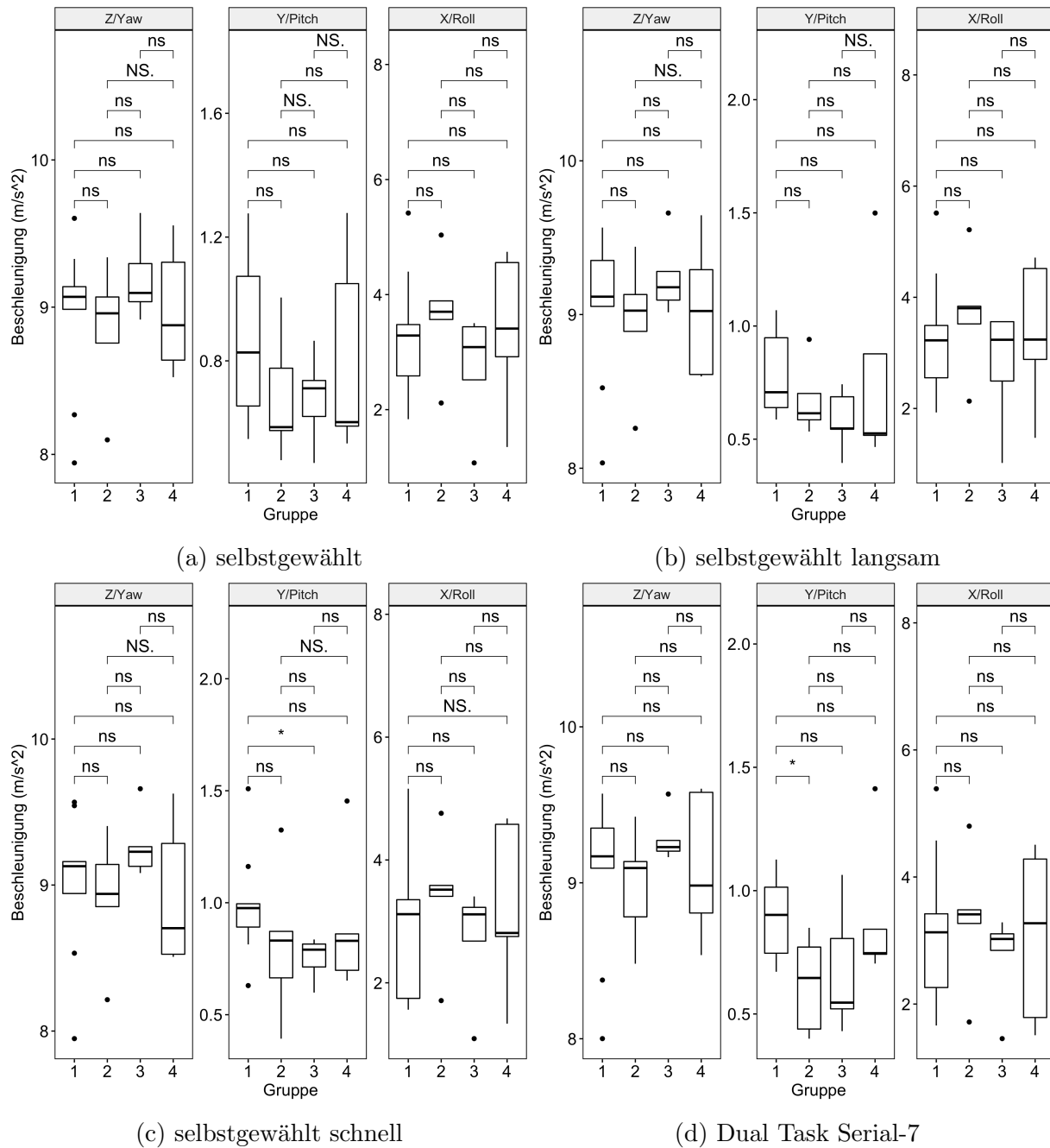


Abbildung 5.3: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie



Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	8.938	0.515	0.116	1	9.055	0.49	0.129
1	0.866	0.256	0.655	1	0.788	0.185	0.189
1	3.292	1.087	0.562	1	3.31	1.114	0.495
2	8.844	0.467	0.587	2	8.949	0.436	0.637
2	0.684	0.209	0.44	2	0.675	0.16	0.248
2	3.662	1.041	0.657	2	3.702	1.097	0.654
3	9.197	0.283	0.543	3	9.245	0.252	0.328
3	0.681	0.146	0.941	3	0.583	0.136	0.714
3	2.725	1.002	0.165	3	2.777	1.074	0.127
4	8.98	0.439	0.585	4	9.034	0.45	0.496
4	0.81	0.333	0.129	4	0.777	0.436	0.065
4	3.396	1.376	0.579	4	3.365	1.32	0.604

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	9.009	0.502	0.133	1	9.03	0.509	0.047
1	0.985	0.244	0.324	1	0.889	0.17	0.472
1	3.024	1.264	0.373	1	3.225	1.178	0.585
2	8.91	0.443	0.683	2	8.983	0.361	0.876
2	0.817	0.34	0.845	2	0.621	0.198	0.482
2	3.396	1.09	0.417	2	3.336	1.095	0.531
3	9.272	0.228	0.136	3	9.287	0.162	0.048
3	0.751	0.097	0.336	3	0.673	0.259	0.374
3	2.704	0.94	0.066	3	2.743	0.737	0.032
4	8.93	0.501	0.213	4	9.102	0.474	0.358
4	0.899	0.322	0.064	4	0.89	0.297	0.009
4	3.231	1.405	0.386	4	3.072	1.383	0.306

Tabelle 5.4: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Signifikante Unterschiede der Beschleunigung finden sich für die Y-Achse der Gruppen 1 ( $0.985 \pm 0.244 [m/s^2]$ ) und 3 ( $0.751 \pm 0.097 [m/s^2]$ ) beim schnellen Gehen sowie der Gruppe 1 ( $0.889 \pm 0.17 [m/s^2]$ ) und 2 ( $0.621 \pm 0.198 [m/s^2]$ ) beim Dual Task.

### 5.2.2 IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

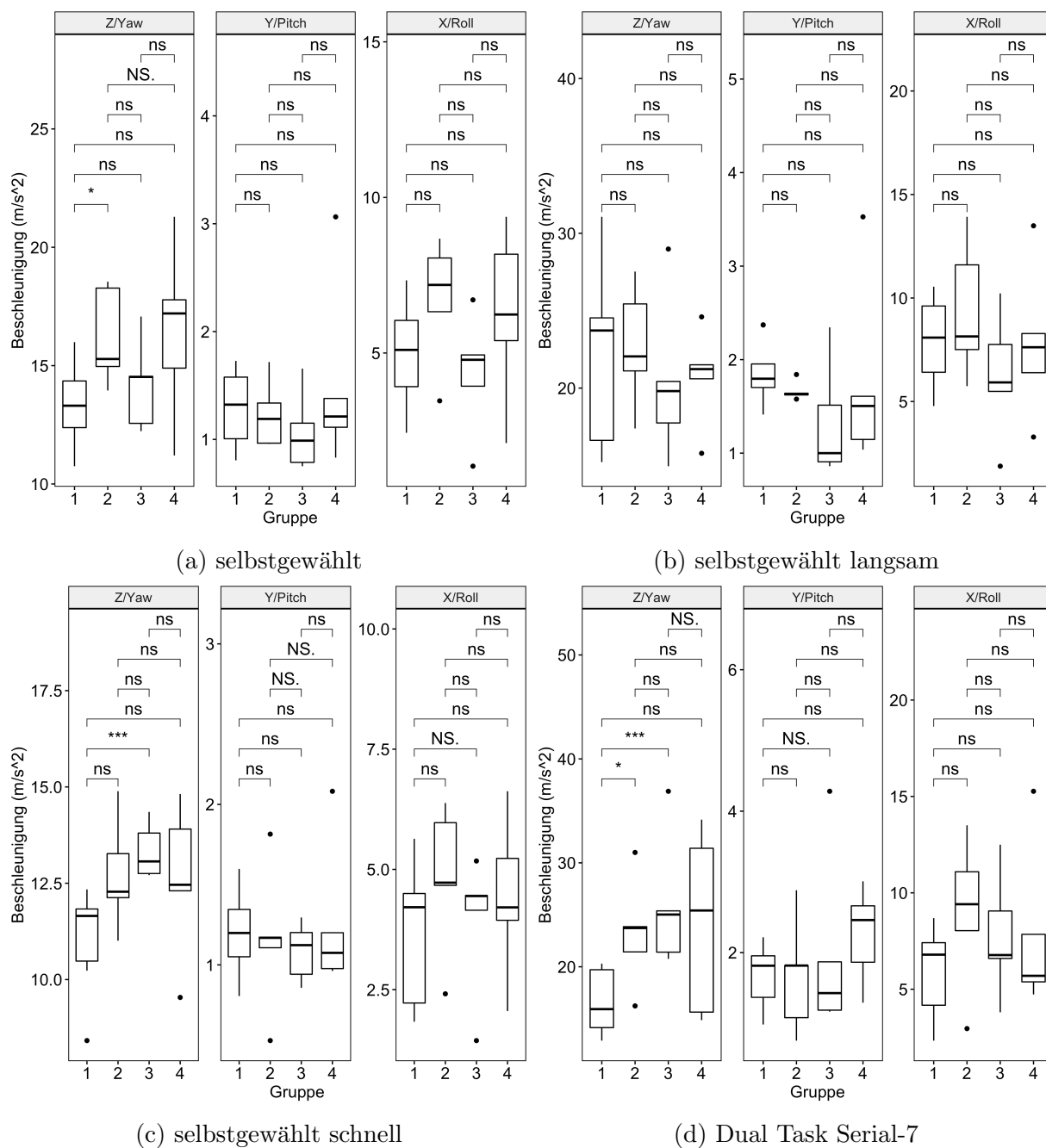


Abbildung 5.4: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	13.197	1.623	0.974	1	22.236	5.385	0.32
1	1.262	0.327	0.443	1	1.864	0.325	0.246
1	4.845	1.532	0.944	1	7.824	2.161	0.488
2	16.203	2.075	0.232	2	22.702	3.934	0.921
2	1.234	0.314	0.385	2	1.662	0.103	0.036
2	6.741	2.036	0.457	2	9.383	3.309	0.677
3	14.187	1.938	0.46	3	20.384	5.261	0.399
3	1.067	0.367	0.318	3	1.325	0.627	0.11
3	4.345	1.948	0.724	3	6.253	3.076	0.939
4	16.474	3.729	0.95	4	20.743	3.173	0.509
4	1.52	0.886	0.04	4	1.765	1.013	0.036
4	6.258	2.8	0.841	4	7.813	3.708	0.756

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	11.142	1.256	0.098	1	16.663	2.912	0.23
1	1.205	0.253	0.66	1	1.649	0.438	0.553
1	3.724	1.464	0.256	1	5.948	2.107	0.583
2	12.715	1.455	0.815	2	23.249	5.319	0.776
2	1.158	0.456	0.485	2	1.671	0.82	0.659
2	4.831	1.548	0.459	2	9.001	3.944	0.833
3	13.337	0.716	0.31	3	25.891	6.486	0.097
3	1.084	0.181	0.746	3	1.986	1.314	0.017
3	3.934	1.444	0.059	3	7.747	3.243	0.837
4	12.605	2.007	0.68	4	24.295	8.843	0.326
4	1.259	0.469	0.016	4	2.257	0.681	0.794
4	4.412	1.686	0.959	4	7.786	4.343	0.041

Tabelle 5.5: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei Korrelation der Kopfsensorbeschleunigung mit der Ganggeschwindigkeit finden sich signifikante Unterschiede für das selbstgewählte Gehen, die Z-Achse der Gruppen 1 ( $13.197 \pm 1.623$  [ $m/s^2$ ]) und 2 ( $16.203 \pm 2.075$  [ $m/s^2$ ]) sowie beim schnellen Gehen für die Z-Achse zwischen der Gruppe 1 ( $11.142 \pm 1.256$  [ $m/s^2$ ]) und 3 ( $13.337 \pm 0.716$  [ $m/s^2$ ]). Beim Dual Task zeigt sich ein signifikanter Unterschied der Z-Achse für die Gruppen 1 ( $16.663 \pm 2.912$  [ $m/s^2$ ]), 2

$(23.249 \pm 5.319 \text{ [m/s}^2\text{)})$  und 3  $(25.891 \pm 6.486 \text{ [m/s}^2\text{)})$ .

## 5.2.3 IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich

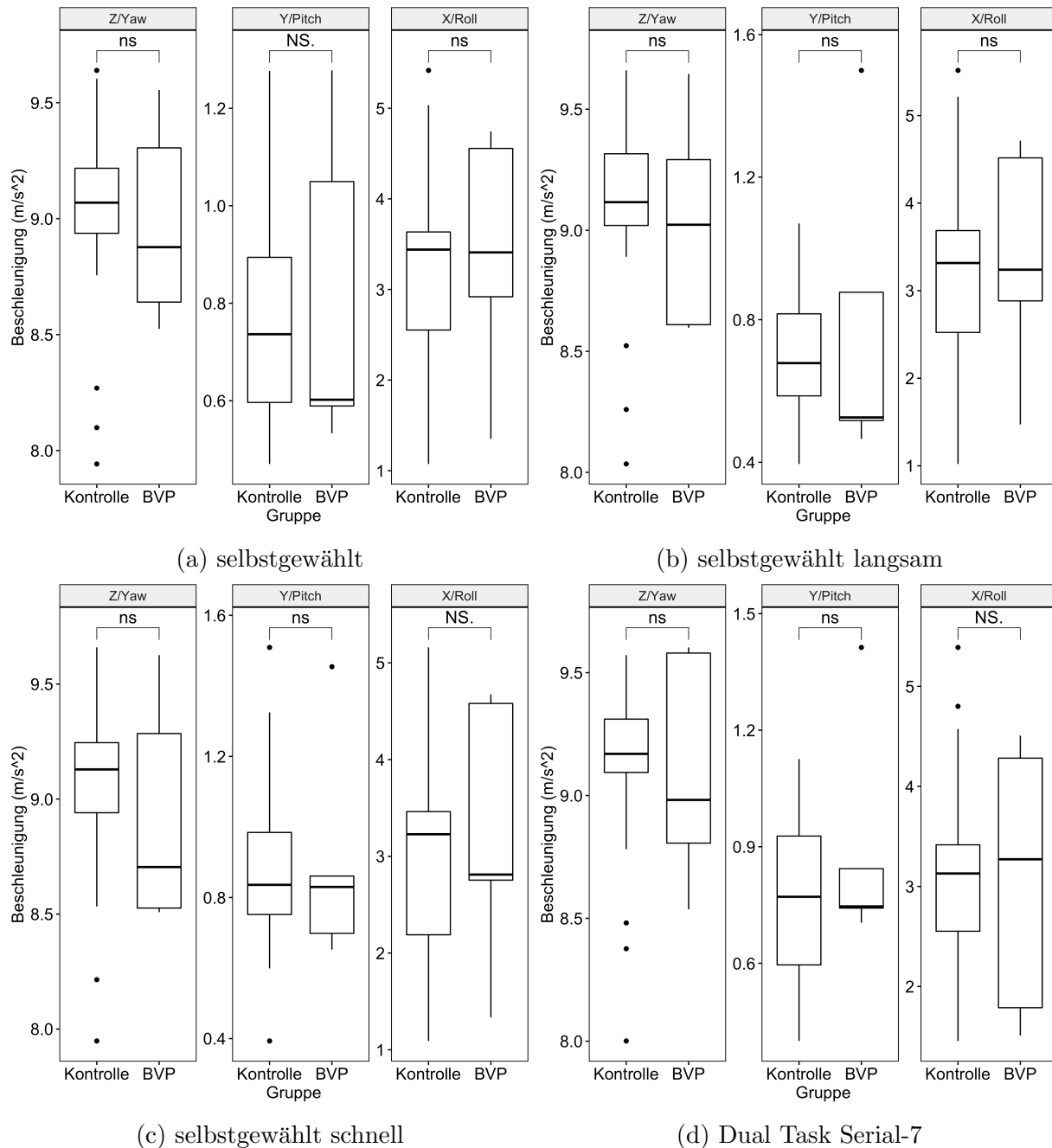


Abbildung 5.5: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	8.982	0.451	0.021	1	9.077	0.419	0.038
1	0.769	0.229	0.257	1	0.705	0.181	0.164
1	3.24	1.055	0.861	1	3.273	1.094	0.693
4	8.98	0.439	0.585	4	9.034	0.45	0.496
4	0.81	0.333	0.129	4	0.777	0.436	0.065
4	3.396	1.376	0.579	4	3.365	1.32	0.604

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	9.052	0.433	0.031	1	9.086	0.407	0.006
1	0.879	0.256	0.355	1	0.762	0.229	0.527
1	3.038	1.113	0.3	1	3.128	1.03	0.179
4	8.93	0.501	0.213	4	9.102	0.474	0.358
4	0.899	0.322	0.064	4	0.89	0.297	0.009
4	3.231	1.405	0.386	4	3.072	1.383	0.306

Tabelle 5.6: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei Betrachtung der Hauptgruppen zeigt sich kein signifikanter Unterschied.

### 5.2.4 IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

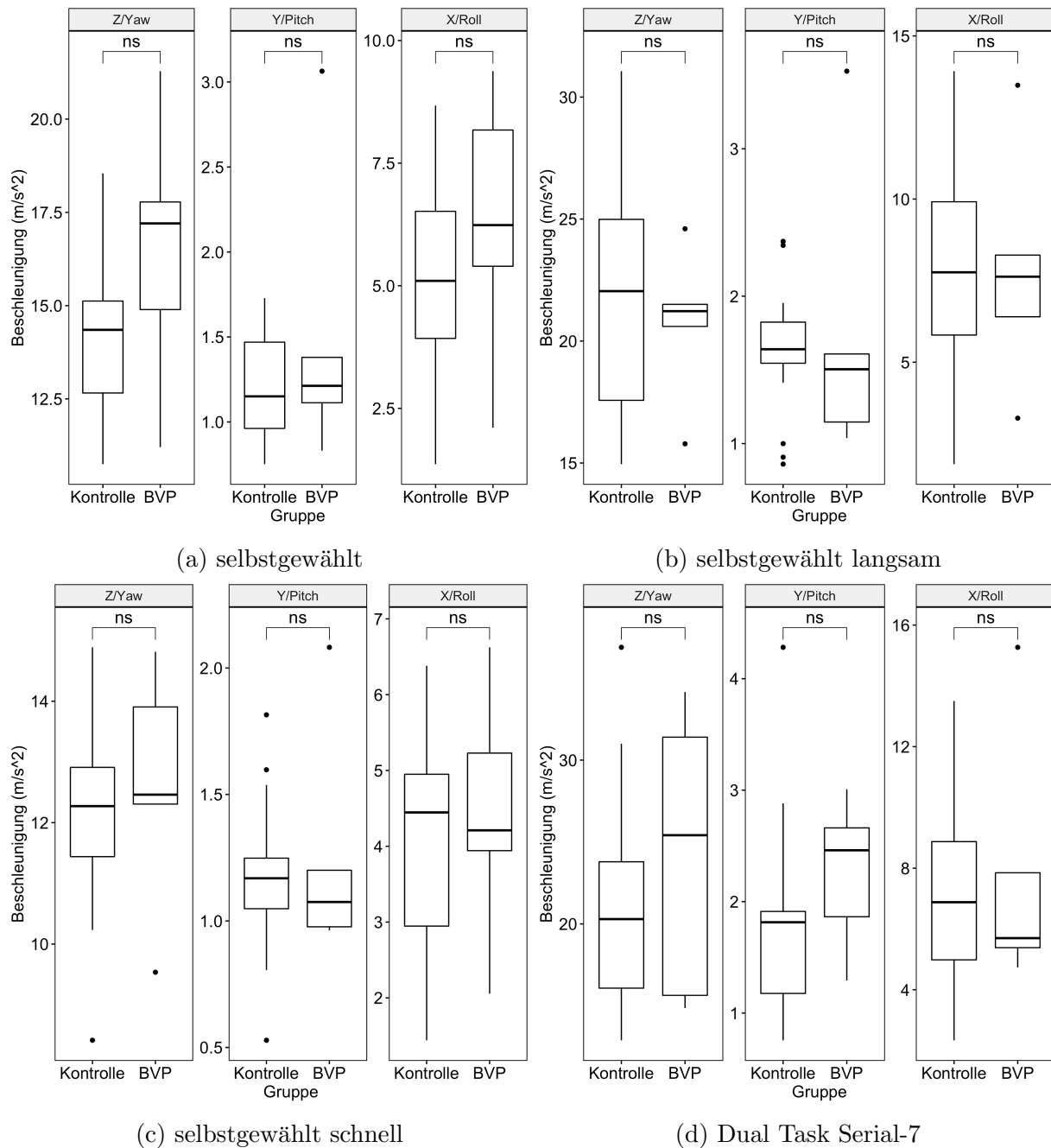


Abbildung 5.6: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	14.248	2.139	0.563	1	21.871	4.832	0.613
1	1.203	0.326	0.093	1	1.669	0.434	0.127
1	5.212	1.932	0.988	1	7.821	2.823	0.983
4	16.474	3.729	0.95	4	20.743	3.173	0.509
4	1.52	0.886	0.04	4	1.765	1.013	0.036
4	6.258	2.8	0.841	4	7.813	3.708	0.756

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	12.133	1.508	0.88	1	20.825	6.069	0.127
1	1.161	0.291	0.652	1	1.744	0.8	0.003
1	4.071	1.475	0.152	1	7.225	3.088	0.676
4	12.605	2.007	0.68	4	24.295	8.843	0.326
4	1.259	0.469	0.016	4	2.257	0.681	0.794
4	4.412	1.686	0.959	4	7.786	4.343	0.041

Tabelle 5.7: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Auch bei Geschwindigkeitskorrelation ergibt sich für diese beiden Gruppen kein signifikanter Unterschied.



## 5.2.5 IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich

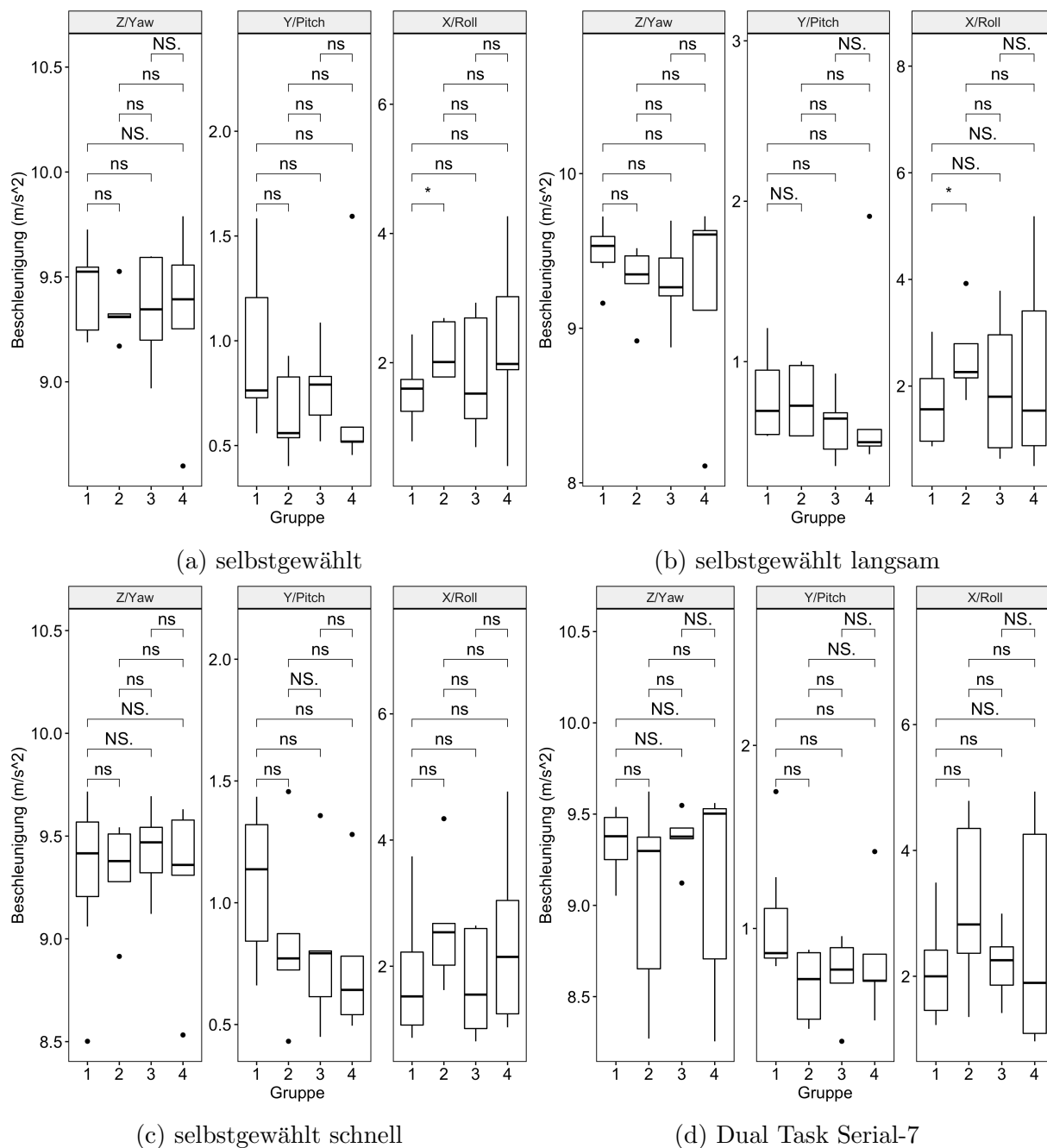


Abbildung 5.7: Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	9.442	0.182	0.332	1	9.504	0.164	0.57
1	0.954	0.34	0.268	1	0.751	0.241	0.083
1	1.504	0.513	0.662	1	1.604	0.744	0.18
2	9.327	0.127	0.373	2	9.308	0.236	0.278
2	0.651	0.218	0.536	2	0.755	0.227	0.157
2	2.178	0.452	0.096	2	2.575	0.843	0.46
3	9.341	0.268	0.492	3	9.3	0.304	0.967
3	0.775	0.213	0.895	3	0.611	0.222	0.86
3	1.794	0.976	0.458	3	2.006	1.355	0.548
4	9.318	0.449	0.576	4	9.237	0.674	0.067
4	0.735	0.483	0.002	4	0.776	0.634	0.002
4	2.312	1.437	0.92	4	2.303	1.96	0.418

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	9.336	0.379	0.157	1	9.349	0.172	0.468
1	1.079	0.293	0.268	1	1.045	0.313	0.018
1	1.851	0.977	0.154	1	2.089	0.748	0.608
2	9.325	0.252	0.302	2	9.044	0.561	0.491
2	0.851	0.376	0.466	2	0.686	0.201	0.269
2	2.639	1.039	0.375	2	3.136	1.42	0.701
3	9.43	0.218	0.965	3	9.367	0.155	0.529
3	0.803	0.342	0.405	3	0.743	0.224	0.48
3	1.723	0.863	0.229	3	2.199	0.599	0.995
4	9.282	0.441	0.101	4	9.111	0.597	0.076
4	0.748	0.317	0.151	4	0.841	0.349	0.248
4	2.447	1.522	0.511	4	2.629	1.846	0.191

Tabelle 5.8: Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Für den Rumpfsensor zeigt sich im Untergruppenvergleich ein signifikanter Unterschied für die X-Achse der Gruppen 1 ( $1.604 \pm 0.744 [m/s^2]$ ) und 2 ( $2.575 \pm 0.843 [m/s^2]$ ) beim langsamen Gehen.

### 5.2.6 IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

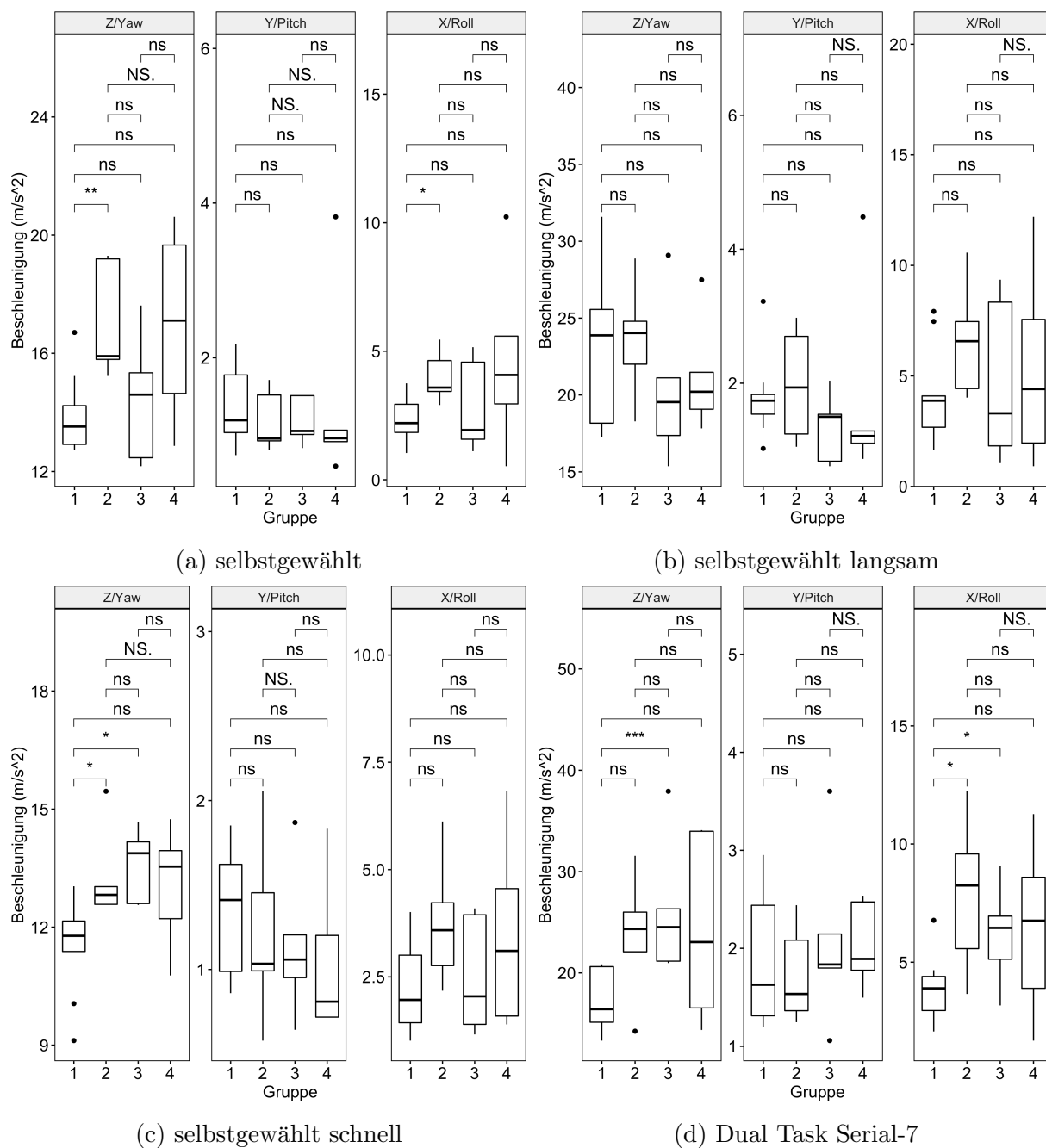


Abbildung 5.8: Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	13.919	1.33	0.064	1	23.204	4.967	0.476
1	1.415	0.534	0.304	1	1.8	0.609	0.057
1	2.256	0.891	0.825	1	4.014	2.272	0.084
2	17.086	1.989	0.059	2	23.598	3.878	0.97
2	1.185	0.403	0.192	2	1.981	0.854	0.478
2	4.002	1.023	0.631	2	6.609	2.641	0.58
3	14.44	2.231	0.602	3	20.495	5.271	0.429
3	1.184	0.311	0.201	3	1.334	0.534	0.458
3	2.869	1.856	0.18	3	4.777	3.814	0.232
4	16.98	3.272	0.704	4	21.215	3.757	0.255
4	1.472	1.325	0.005	4	1.791	1.514	0.003
4	4.673	3.613	0.816	4	5.408	4.573	0.629

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	11.546	1.238	0.264	1	17.244	2.84	0.171
1	1.325	0.36	0.514	1	1.947	0.691	0.107
1	2.267	1.123	0.174	1	3.817	1.413	0.498
2	13.29	1.224	0.007	2	23.645	6.309	0.89
2	1.223	0.559	0.775	2	1.733	0.509	0.429
2	3.776	1.526	0.731	2	7.858	3.358	0.96
3	13.576	0.951	0.287	3	26.182	6.947	0.1
3	1.146	0.454	0.597	3	2.088	0.936	0.402
3	2.529	1.402	0.161	3	6.155	2.191	0.985
4	13.041	1.564	0.767	4	24.406	9.349	0.218
4	1.056	0.478	0.09	4	2.035	0.453	0.409
4	3.494	2.259	0.509	4	6.438	3.779	0.961

Tabelle 5.9: Absolute median Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrelation der Rumpfsensordaten zeigen sich signifikante Unterschiede beim selbstgewählten Gehen zwischen den Gruppen 1 und 2 für die Z-Achse ( $13.919 \pm 1.33$  vs.  $17.086 \pm 1.989$  [ $m/s^2$ ]) und X-Achse ( $2.256 \pm 0.891$  vs.  $4.002 \pm 1.023$  [ $m/s^2$ ]). Für das schnelle Gehen zeigt sich ein Unterschied der Z-Achse der Gruppen 1 ( $11.546 \pm 1.238$  [ $m/s^2$ ]) und 2 ( $13.29 \pm 1.224$  [ $m/s^2$ ]) sowie 1 und 3 ( $13.576 \pm 0.951$  [ $m/s^2$ ]). Für die Dual

---

Task Bedingung zeigt sich ein Unterschied der Z-Achse für die Gruppen 1 ( $17.244 \pm 2.84$  [ $m/s^2$ ]) und 3 ( $26.182 \pm 6.947$  [ $m/s^2$ ]) als auch für die X-Achse der Gruppen 1 ( $3.817 \pm 1.413$  [ $m/s^2$ ]) und 2 ( $7.858 \pm 3.358$  [ $m/s^2$ ]) sowie 1 und 3 ( $6.155 \pm 2.191$  [ $m/s^2$ ]).

## 5.2.7 IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich

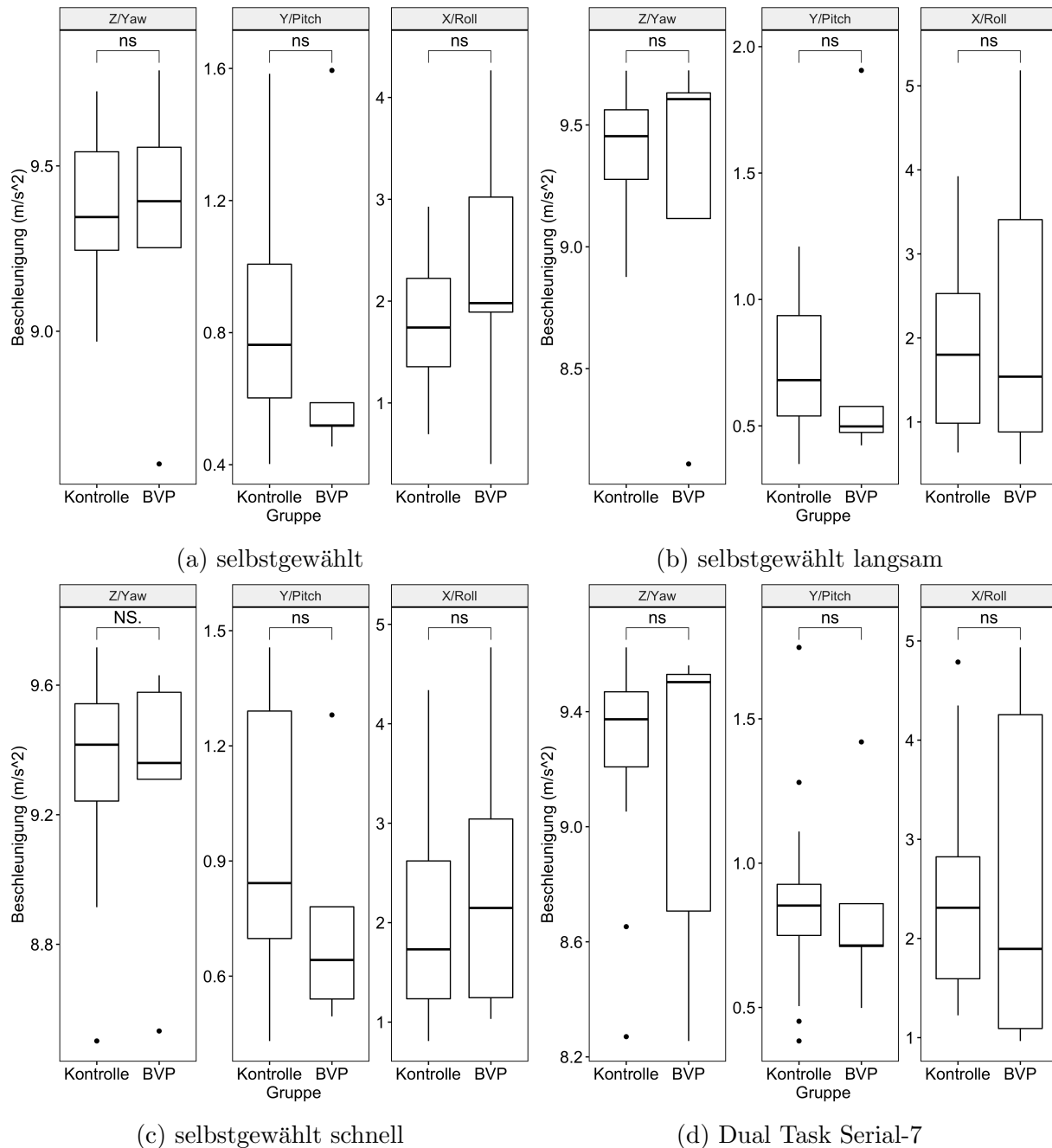


Abbildung 5.9: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	9.385	0.194	0.513	1	9.399	0.235	0.189
1	0.827	0.299	0.176	1	0.715	0.229	0.181
1	1.758	0.675	0.349	1	1.965	0.99	0.194
4	9.318	0.449	0.576	4	9.237	0.674	0.067
4	0.735	0.483	0.002	4	0.776	0.634	0.002
4	2.312	1.437	0.92	4	2.303	1.96	0.418

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	9.358	0.301	0.039	1	9.273	0.329	0.001
1	0.946	0.335	0.129	1	0.871	0.305	0.049
1	2.025	0.987	0.154	1	2.393	0.993	0.052
4	9.282	0.441	0.101	4	9.111	0.597	0.076
4	0.748	0.317	0.151	4	0.841	0.349	0.248
4	2.447	1.522	0.511	4	2.629	1.846	0.191

Tabelle 5.10: Absolute median Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei Betrachtung der Hauptgruppen zeigt sich kein signifikanter Unterschied.

### 5.2.8 IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

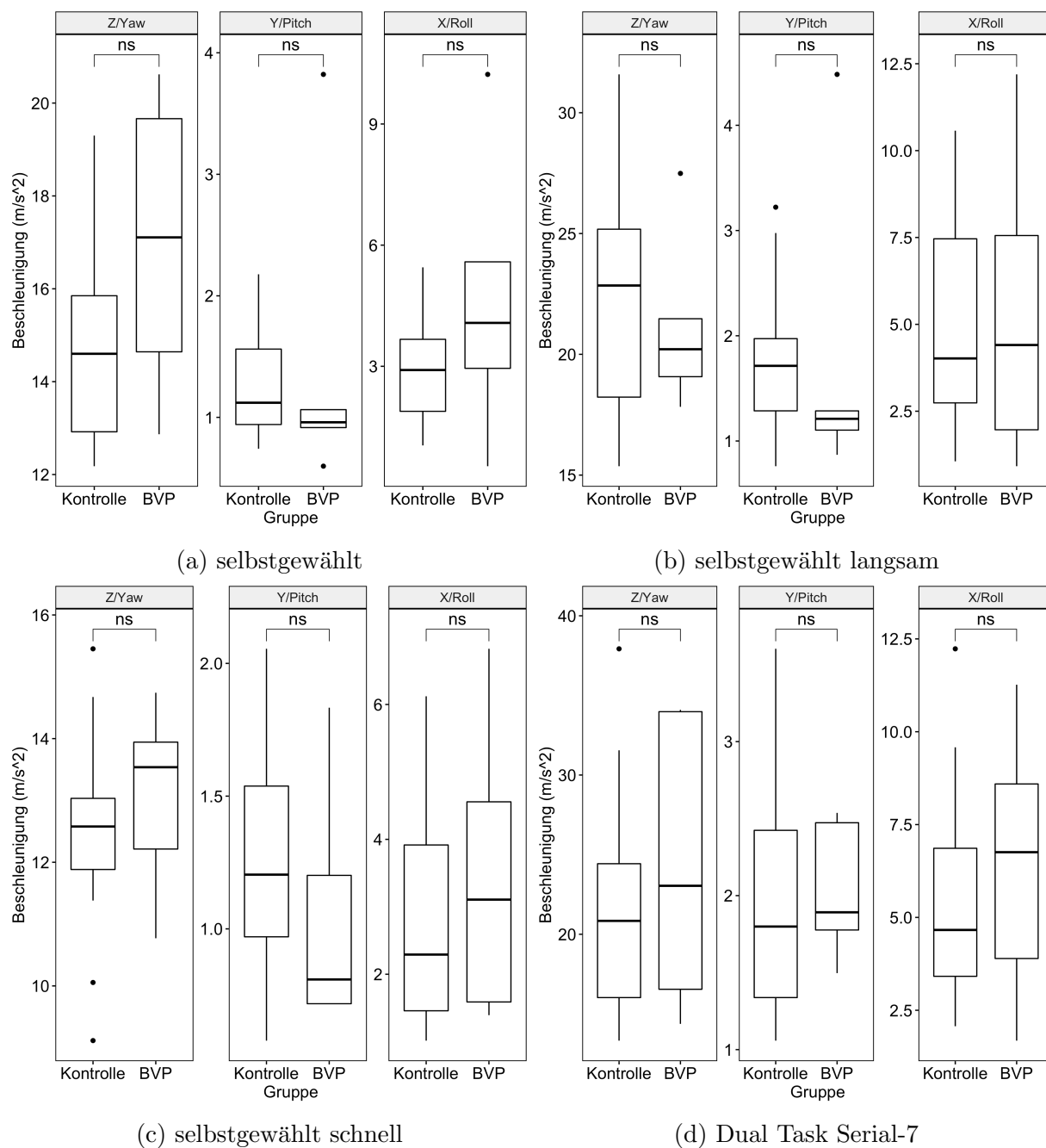


Abbildung 5.10: Absolute median Beschleunigung Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie



Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	14.89	2.154	0.1	1	22.595	4.709	0.443
1	1.294	0.445	0.053	1	1.725	0.674	0.205
1	2.877	1.377	0.294	1	4.898	2.878	0.126
4	16.98	3.272	0.704	4	21.215	3.757	0.255
4	1.472	1.325	0.005	4	1.791	1.514	0.003
4	4.673	3.613	0.816	4	5.408	4.573	0.629

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	12.539	1.471	0.472	1	21.28	6.287	0.086
1	1.251	0.423	0.568	1	1.928	0.694	0.133
1	2.733	1.392	0.086	1	5.496	2.746	0.119
4	13.041	1.564	0.767	4	24.406	9.349	0.218
4	1.056	0.478	0.09	4	2.035	0.453	0.409
4	3.494	2.259	0.509	4	6.438	3.779	0.961

Tabelle 5.11: Absolute median Beschleunigung Beschleunigung des Kopfes im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Auch die Geschwindigkeitskorrelation zeigt hier keinen signifikanten Unterschied der beiden Gruppen.

## 5.2.9 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich

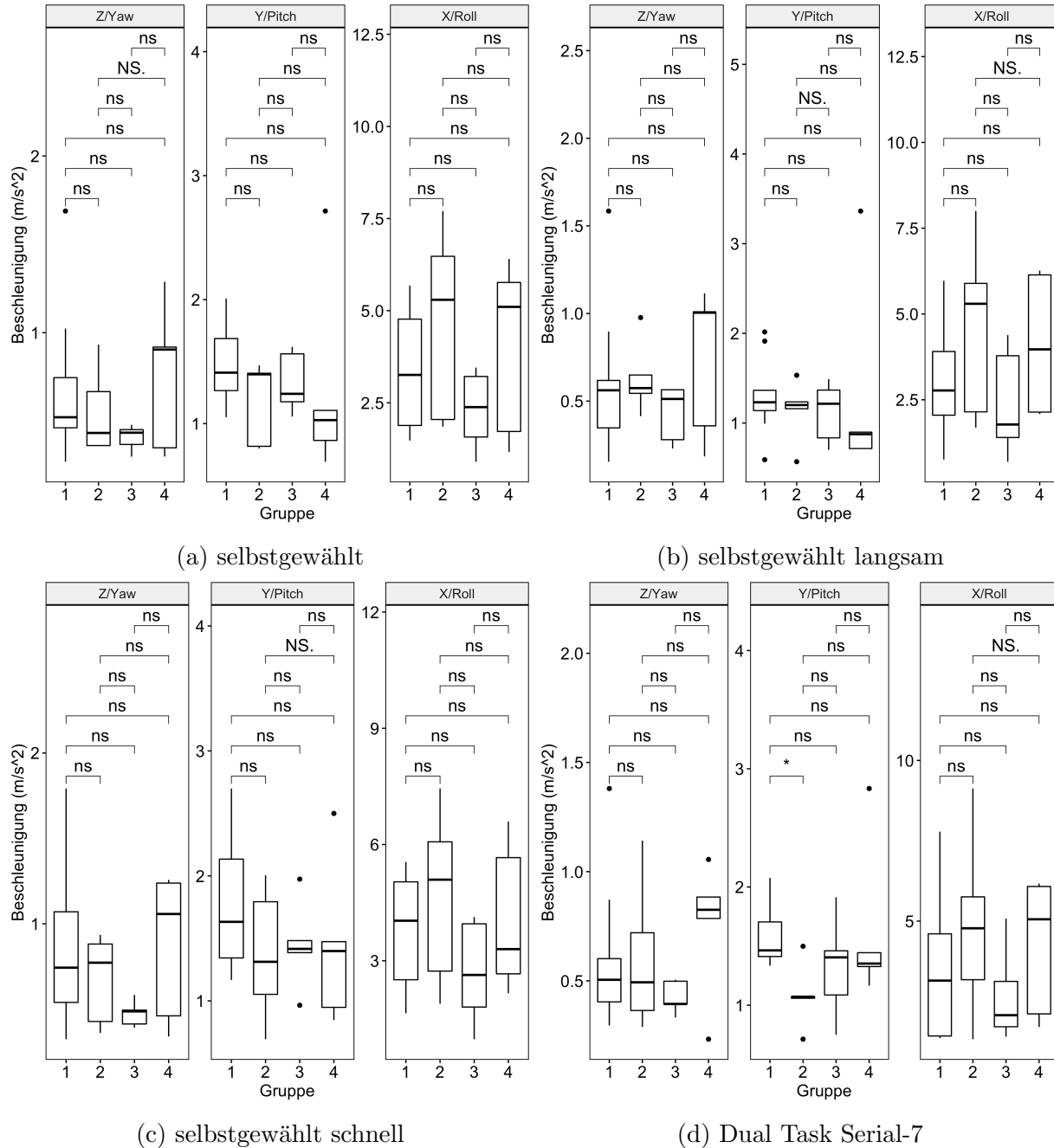


Abbildung 5.11: Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.682	0.439	0.034	1	0.59	0.438	0.075
1	1.475	0.315	0.642	1	1.304	0.437	0.416
1	3.351	1.505	0.471	1	3.208	1.802	0.636
2	0.551	0.248	0.165	2	0.632	0.211	0.391
2	1.178	0.339	0.032	2	1.14	0.351	0.307
2	4.675	2.63	0.349	2	4.606	2.653	0.539
3	0.406	0.073	0.571	3	0.431	0.163	0.094
3	1.331	0.247	0.376	3	1.122	0.34	0.521
3	2.305	1.079	0.666	3	2.41	1.592	0.431
4	0.752	0.42	0.381	4	0.735	0.429	0.109
4	1.281	0.817	0.022	4	1.314	1.149	0.001
4	4.032	2.415	0.2	4	4.119	2.046	0.154

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.836	0.456	0.396	1	0.597	0.339	0.019
1	1.769	0.527	0.382	1	1.597	0.275	0.031
1	3.771	1.458	0.419	1	3.489	2.213	0.163
2	0.676	0.264	0.239	2	0.602	0.343	0.428
2	1.371	0.535	0.839	2	1.083	0.279	0.351
2	4.647	2.308	0.729	2	4.832	2.928	0.946
3	0.475	0.076	0.655	3	0.425	0.075	0.311
3	1.445	0.359	0.616	3	1.323	0.435	0.951
3	2.7	1.358	0.559	3	2.679	1.489	0.272
4	0.871	0.438	0.131	4	0.757	0.31	0.178
4	1.433	0.656	0.281	4	1.624	0.683	0.008
4	4.076	1.944	0.362	4	4.225	2.162	0.122

Tabelle 5.12: Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei Betrachtung der Differenz der Beschleunigung zwischen Kopf und Rumpf ergibt sich ein signifikanter Unterschied der Y-Achse für die Gruppen 1 ( $2.597 \pm 0.275 [m/s^2]$ ) und 2 ( $1.083 \pm 0.279 [m/s^2]$ ) jedoch ist für die Gruppe 2 keine Normalverteilung anzunehmen.

### 5.2.10 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

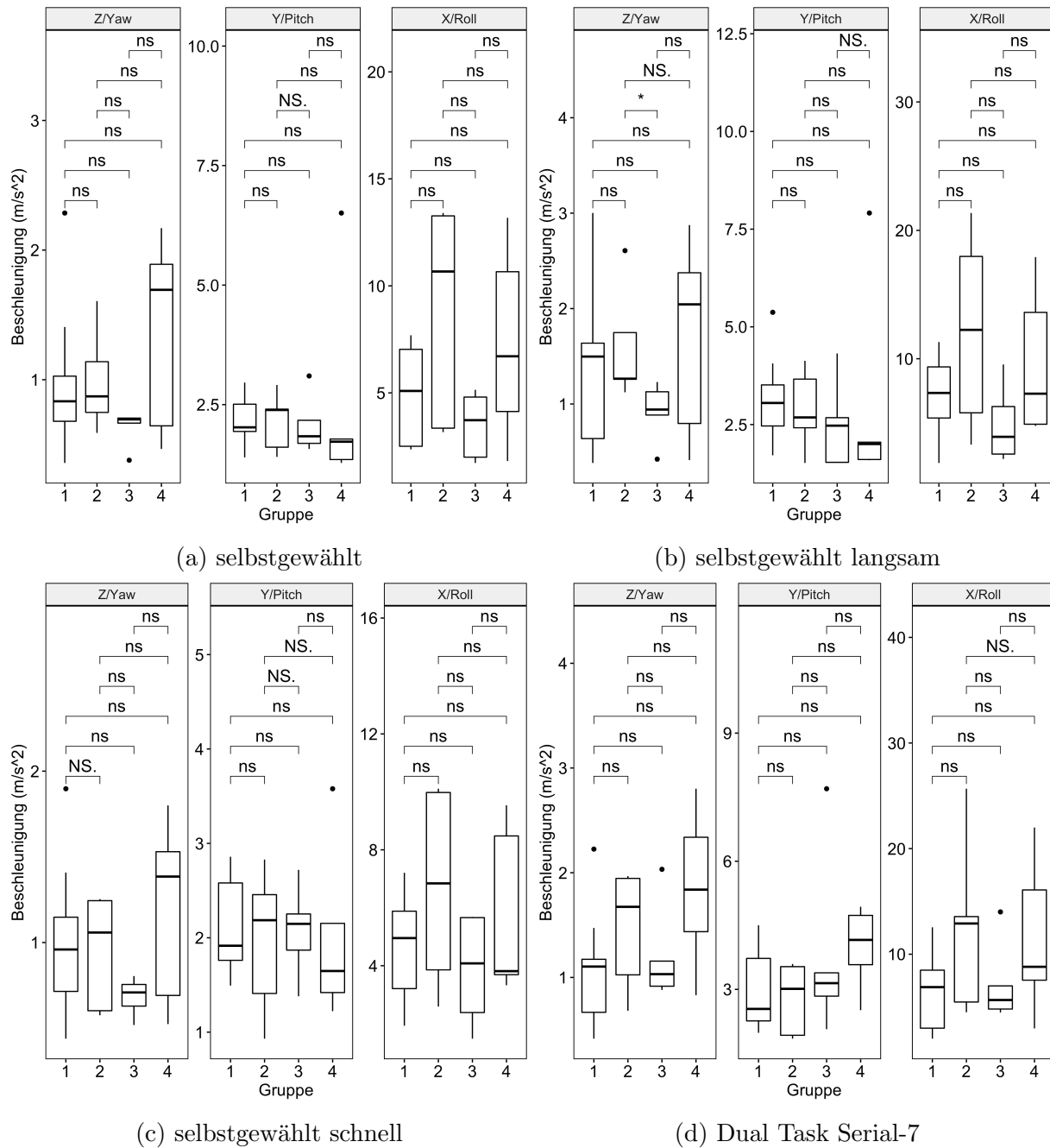


Abbildung 5.12: Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.986	0.577	0.119	1	1.355	0.811	0.177
1	2.178	0.525	0.278	1	3.119	1.113	0.677
1	4.924	2.173	0.145	1	7.186	2.968	0.895
2	0.991	0.398	0.623	2	1.6	0.611	0.111
2	2.144	0.621	0.523	2	2.882	1.034	0.865
2	8.772	5.151	0.077	2	12.134	7.697	0.666
3	0.629	0.141	0.002	3	0.921	0.312	0.482
3	2.075	0.615	0.175	3	2.505	1.142	0.266
3	3.477	1.568	0.318	3	4.905	3.049	0.4
4	1.373	0.767	0.269	4	1.7	1.052	0.525
4	2.529	2.235	0.002	4	3.031	2.737	0.001
4	7.298	4.645	0.844	4	9.697	5.831	0.242

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.001	0.465	0.652	1	1.084	0.54	0.396
1	2.15	0.515	0.185	1	3.004	0.973	0.086
1	4.609	1.698	0.917	1	6.318	3.707	0.474
2	0.947	0.336	0.101	2	1.459	0.577	0.261
2	1.963	0.777	0.734	2	2.782	0.849	0.144
2	6.676	3.44	0.333	2	12.423	8.484	0.362
3	0.683	0.112	0.812	3	1.204	0.476	0.028
3	2.074	0.494	0.973	3	3.828	2.219	0.038
3	3.859	1.9	0.351	3	7.191	3.931	0.037
4	1.186	0.551	0.444	4	1.849	0.767	0.984
4	2.005	0.946	0.189	4	3.983	0.976	0.613
4	5.769	2.985	0.059	4	11.479	7.53	0.761

Tabelle 5.13: Absolute median Beschleunigung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrelation der Daten ergibt sich jedoch kein signifikanter Unterschied mehr.

## 5.2.11 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich

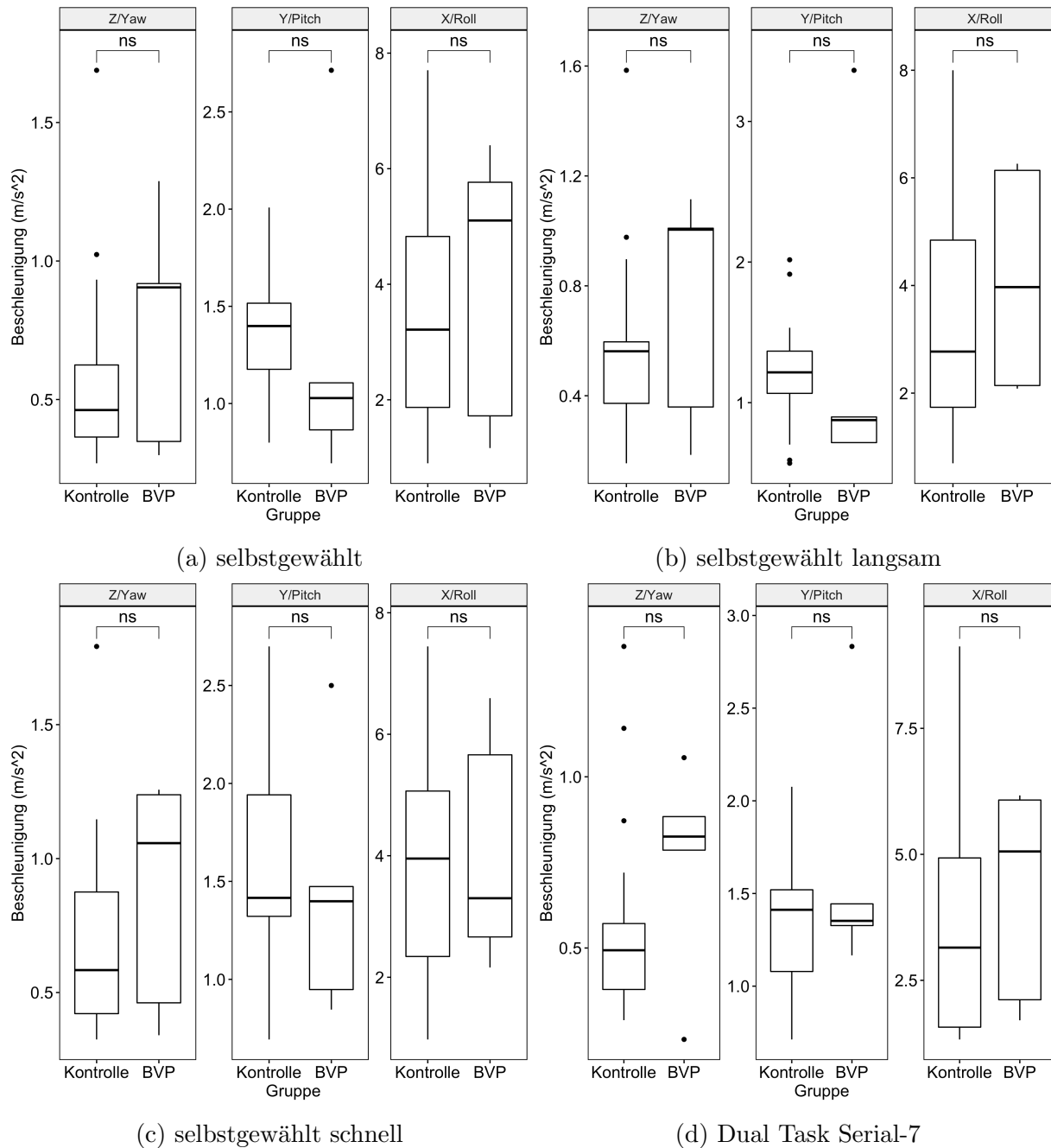


Abbildung 5.13: Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.575	0.338	0	1	0.559	0.328	0.005
1	1.359	0.315	0.889	1	1.213	0.382	0.296
1	3.424	1.894	0.148	1	3.366	2.065	0.208
4	0.752	0.42	0.381	4	0.735	0.429	0.109
4	1.281	0.817	0.022	4	1.314	1.149	0.001
4	4.032	2.415	0.2	4	4.119	2.046	0.154

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.699	0.364	0.007	1	0.553	0.291	0.001
1	1.579	0.501	0.799	1	1.389	0.377	0.406
1	3.719	1.751	0.677	1	3.63	2.289	0.021
4	0.871	0.438	0.131	4	0.757	0.31	0.178
4	1.433	0.656	0.281	4	1.624	0.683	0.008
4	4.076	1.944	0.362	4	4.225	2.162	0.122

Tabelle 5.14: Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei Betrachtung der Hauptgruppen zeigt sich kein signifikanter Unterschied.

### 5.2.12 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

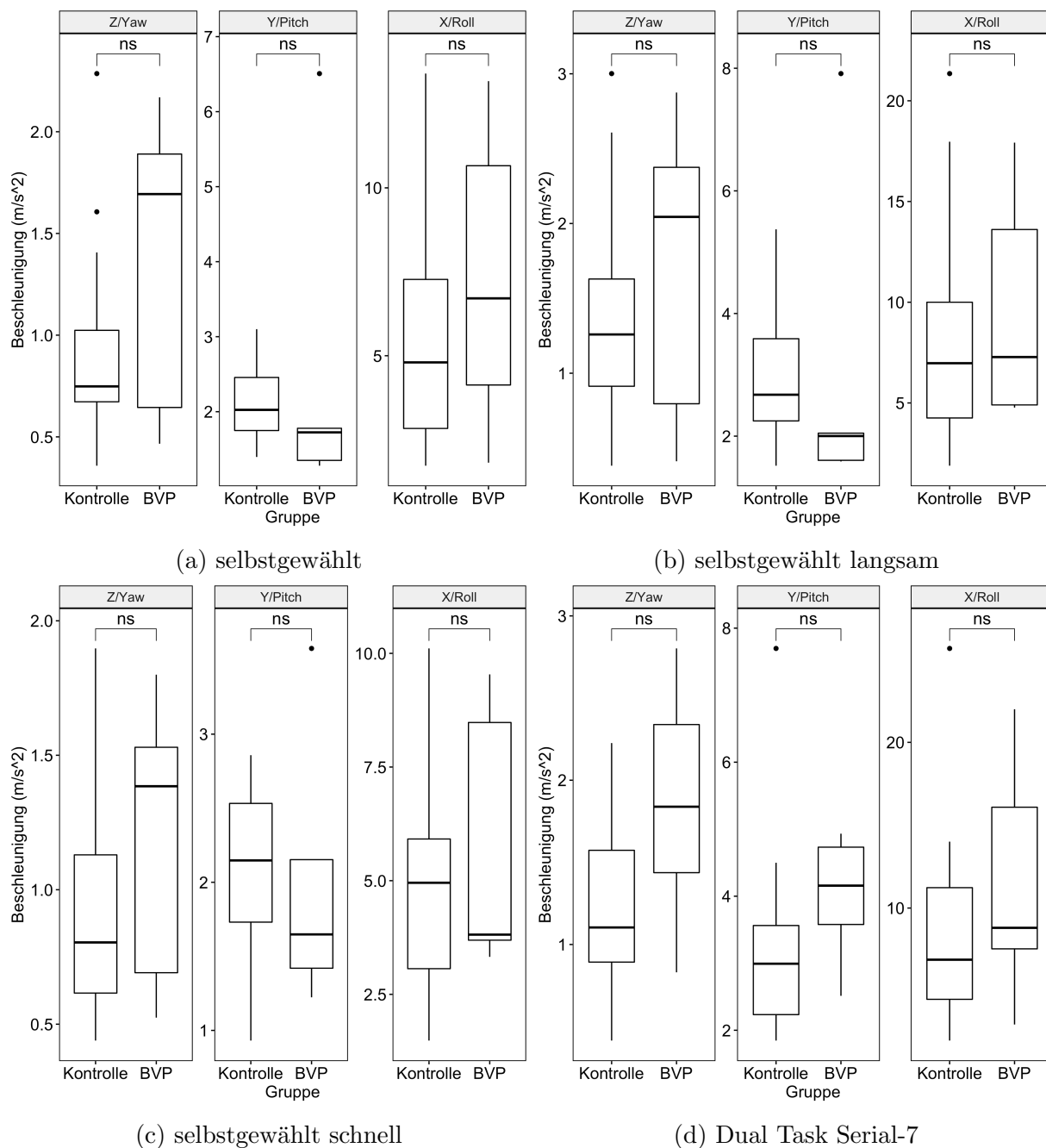


Abbildung 5.14: Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie



Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.894	0.463	0.004	1	1.305	0.681	0.102
1	2.142	0.542	0.169	1	2.895	1.07	0.31
1	5.556	3.579	0.009	1	7.888	5.184	0.036
4	1.373	0.767	0.269	4	1.7	1.052	0.525
4	2.529	2.235	0.002	4	3.031	2.737	0.001
4	7.298	4.645	0.844	4	9.697	5.831	0.242

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.903	0.378	0.145	1	1.214	0.528	0.143
1	2.081	0.559	0.506	1	3.163	1.361	0.001
1	4.956	2.435	0.233	1	8.154	5.704	0.005
4	1.186	0.551	0.444	4	1.849	0.767	0.984
4	2.005	0.946	0.189	4	3.983	0.976	0.613
4	5.769	2.985	0.059	4	11.479	7.53	0.761

Tabelle 5.15: Absolute median Beschleunigung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Auch die Geschwindigkeitskorrelation zeigt hier keinen signifikanten Unterschied der beiden Gruppen.



## 5.3 Winkelgeschwindigkeit

### 5.3.1 IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich

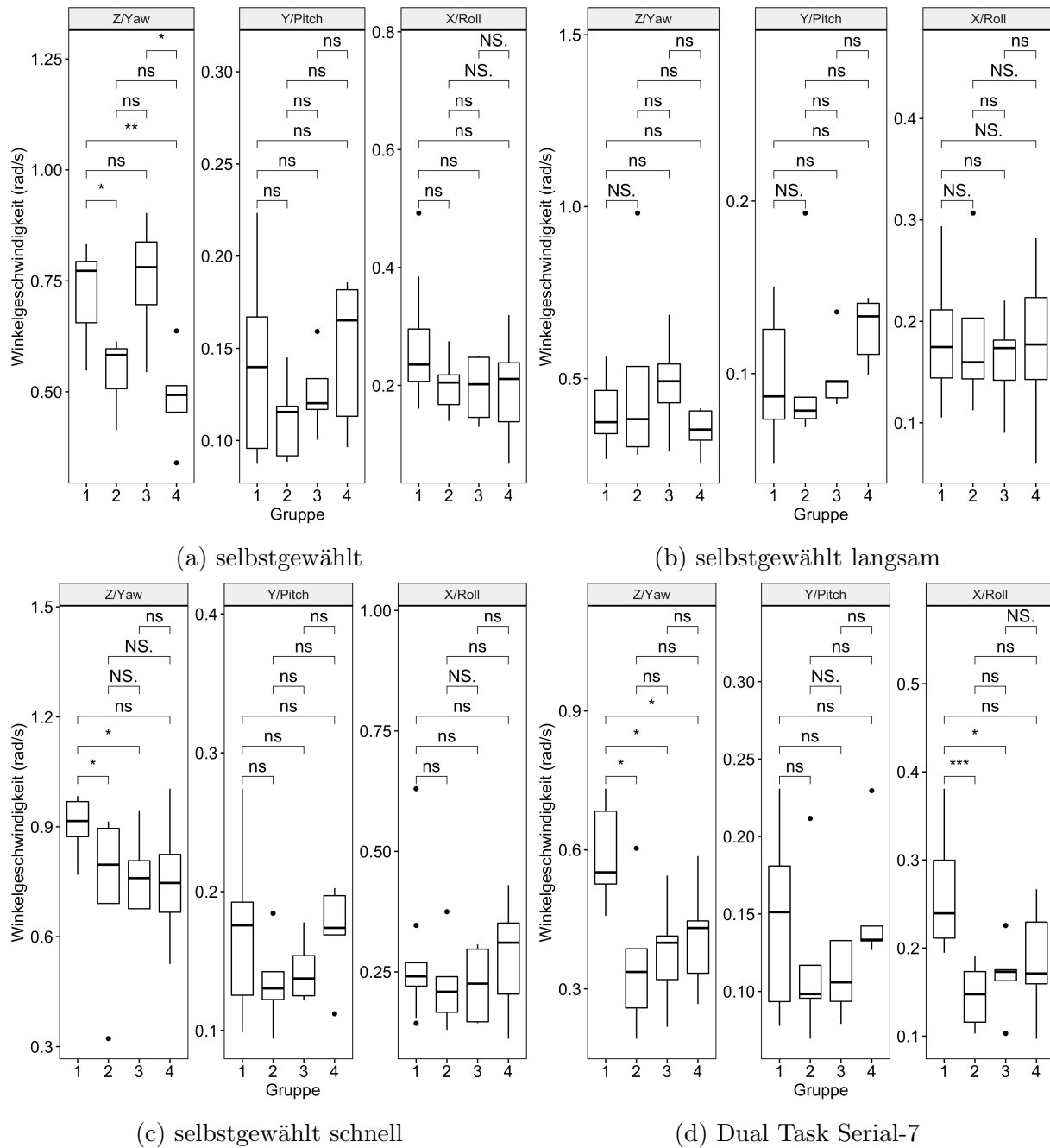


Abbildung 5.15: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.727	0.107	0.061	1	0.41	0.102	0.469
1	0.143	0.049	0.353	1	0.095	0.038	0.225
1	0.274	0.105	0.181	1	0.184	0.06	0.751
2	0.543	0.083	0.259	2	0.496	0.29	0.113
2	0.112	0.023	0.529	2	0.1	0.052	0.004
2	0.201	0.052	0.923	2	0.185	0.076	0.438
3	0.752	0.139	0.819	3	0.487	0.146	0.993
3	0.126	0.022	0.823	3	0.099	0.021	0.064
3	0.195	0.056	0.281	3	0.162	0.049	0.896
4	0.488	0.107	0.914	4	0.349	0.065	0.602
4	0.148	0.041	0.215	4	0.126	0.019	0.352
4	0.195	0.096	0.979	4	0.177	0.084	0.994

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.905	0.074	0.29	1	0.585	0.097	0.258
1	0.175	0.064	0.253	1	0.145	0.056	0.373
1	0.279	0.145	0.01	1	0.256	0.061	0.152
2	0.724	0.242	0.166	2	0.356	0.157	0.637
2	0.135	0.033	0.854	2	0.118	0.055	0.129
2	0.224	0.094	0.536	2	0.146	0.037	0.709
3	0.773	0.112	0.364	3	0.379	0.121	0.951
3	0.143	0.023	0.508	3	0.109	0.024	0.405
3	0.224	0.079	0.193	3	0.168	0.044	0.62
4	0.753	0.178	0.996	4	0.413	0.122	0.876
4	0.171	0.036	0.257	4	0.153	0.043	0.004
4	0.282	0.125	0.908	4	0.185	0.066	0.91

Tabelle 5.16: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Signifikante Unterschiede zeigen sich für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $0.727 \pm 0.107 [rad/s]$ ), 2 ( $0.543 \pm 0.083 [rad/s]$ ) und 4 ( $0.488 \pm 0.107 [rad/s]$ ) sowie 3 ( $0.752 \pm 0.139 [rad/s]$ ) und 4 beim selbst gewählten Gehen. Beim schnellen Gehen für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $0.905 \pm 0.074 [rad/s]$ ), 2 ( $0.724 \pm 0.242 [rad/s]$ ) und 3 ( $0.773 \pm 0.112 [rad/s]$ ). Beim Dual-Task für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $0.585 \pm 0.097 [rad/s]$ ), 2 ( $0.356 \pm 0.157 [rad/s]$ ) und

3 ( $0.379 \pm 0.121 [\text{rad/s}]$ ) sowie für die Roll-Achse der Gruppen 1 ( $0.256 \pm 0.061 [\text{rad/s}]$ ) und 2 ( $0.146 \pm 0.037 [\text{rad/s}]$ ).

### 5.3.2 IMU Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

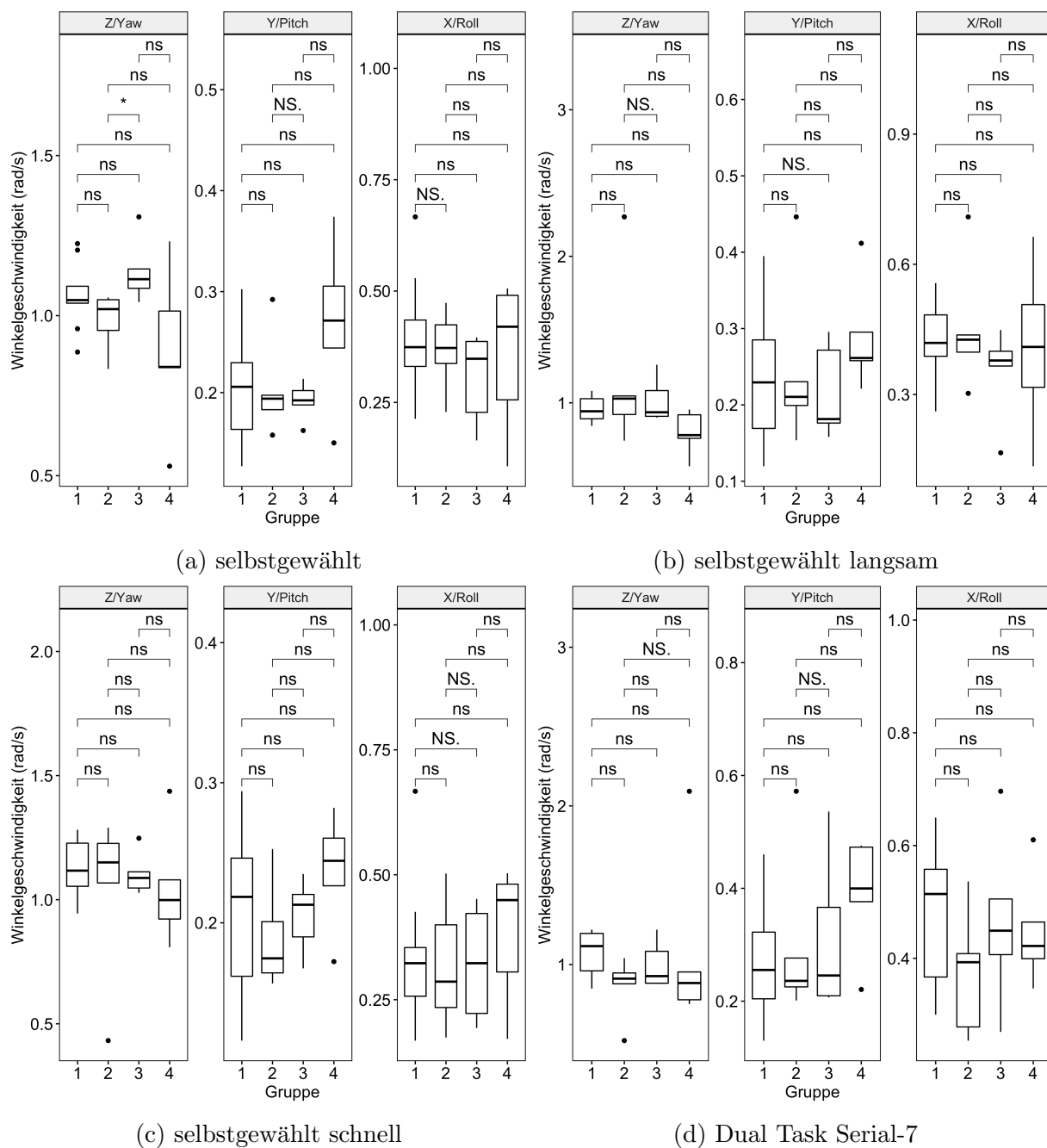


Abbildung 5.16: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.062	0.106	0.512	1	0.957	0.084	0.382
1	0.208	0.061	0.607	1	0.227	0.088	0.649
1	0.398	0.135	0.678	1	0.428	0.089	0.751
2	0.983	0.093	0.205	2	1.201	0.609	0.022
2	0.205	0.051	0.116	2	0.248	0.114	0.055
2	0.367	0.093	0.896	2	0.455	0.152	0.189
3	1.139	0.102	0.312	3	1.017	0.154	0.138
3	0.192	0.019	0.817	3	0.217	0.062	0.168
3	0.305	0.103	0.261	3	0.352	0.109	0.108
4	0.891	0.259	0.876	4	0.796	0.153	0.603
4	0.269	0.082	0.969	4	0.29	0.073	0.223
4	0.356	0.171	0.343	4	0.406	0.199	1

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.116	0.119	0.675	1	1.063	0.15	0.122
1	0.212	0.062	0.717	1	0.267	0.109	0.83
1	0.338	0.147	0.178	1	0.472	0.128	0.392
2	1.033	0.346	0.047	2	0.859	0.199	0.132
2	0.19	0.039	0.27	2	0.302	0.153	0.013
2	0.319	0.132	0.807	2	0.374	0.113	0.612
3	1.104	0.087	0.278	3	0.998	0.149	0.199
3	0.205	0.027	0.823	3	0.313	0.141	0.145
3	0.323	0.115	0.447	3	0.465	0.156	0.904
4	1.049	0.239	0.475	4	1.091	0.565	0.006
4	0.237	0.042	0.742	4	0.389	0.104	0.232
4	0.382	0.141	0.274	4	0.448	0.1	0.486

Tabelle 5.17: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Nach der Geschwindigkeitskorrelation der Daten findet sich lediglich noch für die Yaw-Achse der Gruppen 2 ( $0.983 \pm 0.093 [rad/s]$ ) und 3 ( $1.139 \pm 0.102 [rad/s]$ ) beim selbst gewählten Gehen ein signifikanter Unterschied.

## 5.3.3 IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich

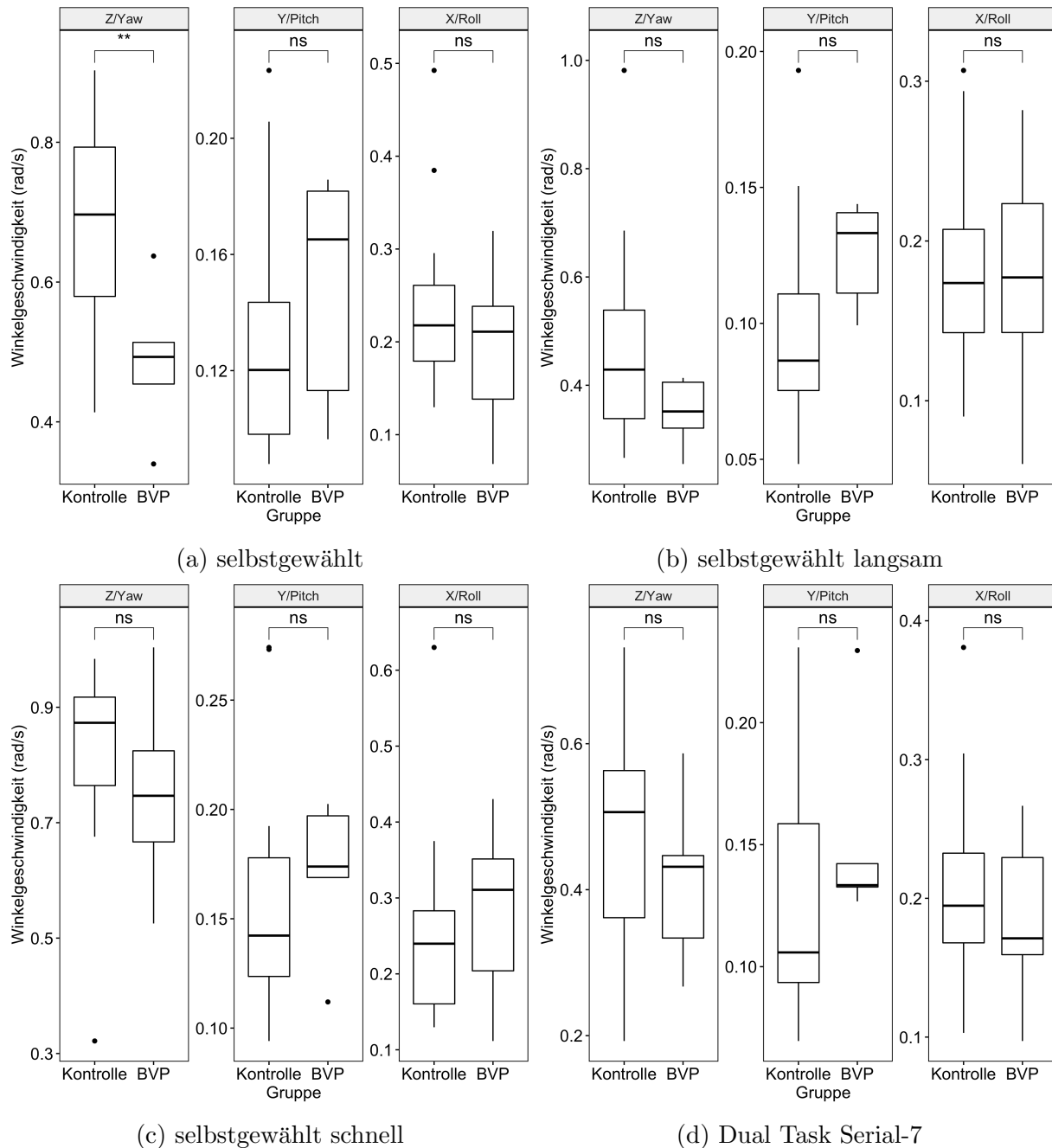


Abbildung 5.17: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie



Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.685	0.136	0.356	1	0.453	0.172	0.008
1	0.13	0.038	0.041	1	0.098	0.037	0.017
1	0.234	0.088	0.012	1	0.178	0.059	0.321
4	0.488	0.107	0.914	4	0.349	0.065	0.602
4	0.148	0.041	0.215	4	0.126	0.019	0.352
4	0.195	0.096	0.979	4	0.177	0.084	0.994

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.823	0.158	0.003	1	0.47	0.159	0.737
1	0.156	0.051	0.015	1	0.129	0.05	0.026
1	0.25	0.116	0.002	1	0.204	0.071	0.339
4	0.753	0.178	0.996	4	0.413	0.122	0.876
4	0.171	0.036	0.257	4	0.153	0.043	0.004
4	0.282	0.125	0.908	4	0.185	0.066	0.91

Tabelle 5.18: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Ein signifikanter Unterschied mit einem höheren Wert zeigt sich hier für die Yaw-Achse der Kontrollgruppe beim selbstgewählten Gehen ( $0.685 \pm 0.136 [rad/s]$  vs.  $0.488 \pm 0.107 [rad/s]$ )

### 5.3.4 IMU Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

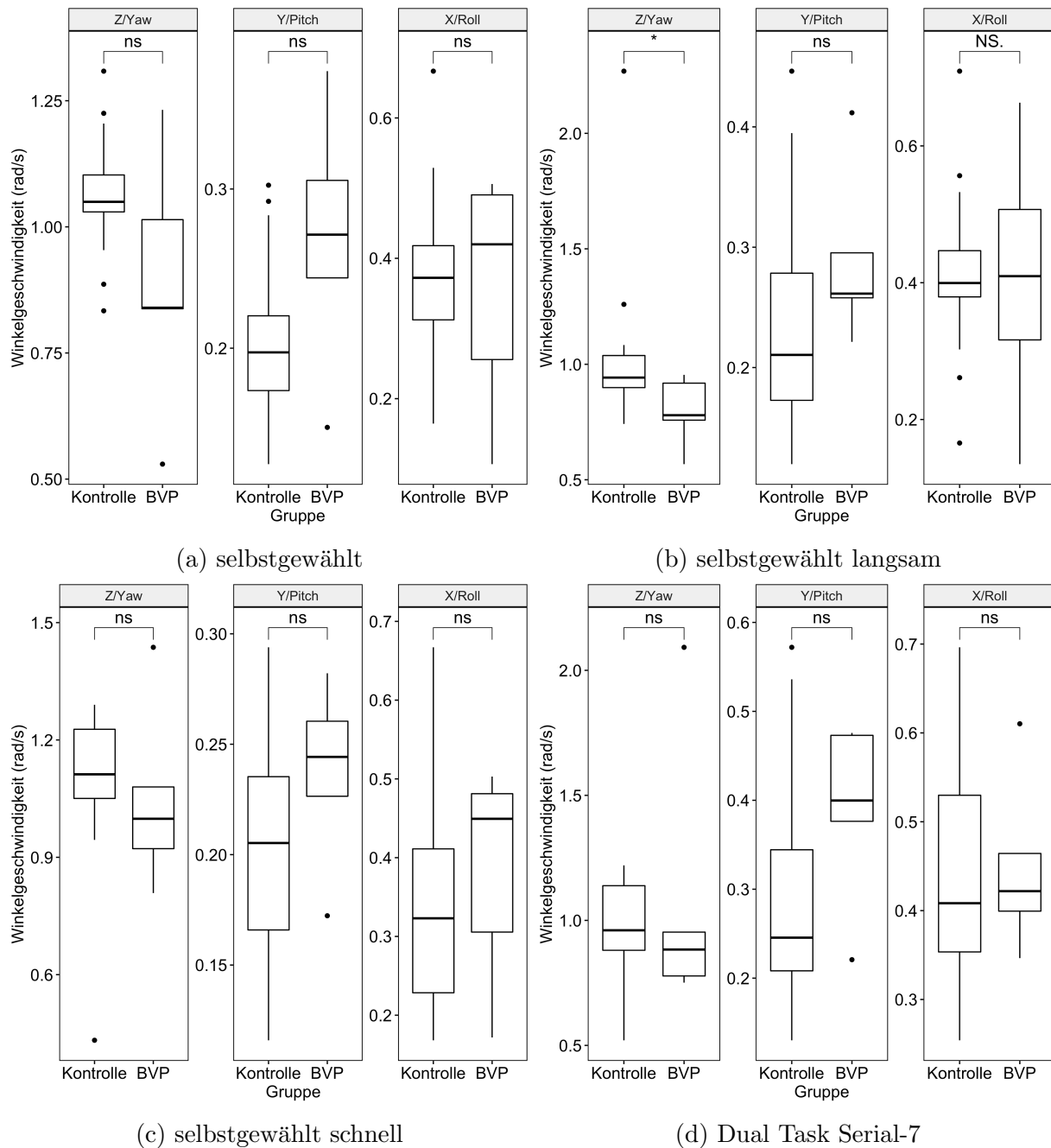


Abbildung 5.18: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.061	0.112	0.575	1	1.037	0.319	0
1	0.203	0.049	0.155	1	0.23	0.086	0.049
1	0.365	0.118	0.542	1	0.415	0.114	0.223
4	0.891	0.259	0.876	4	0.796	0.153	0.603
4	0.269	0.082	0.969	4	0.29	0.073	0.223
4	0.356	0.171	0.343	4	0.406	0.199	1

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.091	0.189	0	1	0.992	0.176	0.064
1	0.204	0.048	0.919	1	0.288	0.124	0.027
1	0.329	0.128	0.19	1	0.444	0.132	0.56
4	1.049	0.239	0.475	4	1.091	0.565	0.006
4	0.237	0.042	0.742	4	0.389	0.104	0.232
4	0.382	0.141	0.274	4	0.448	0.1	0.486

Tabelle 5.19: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei Betrachtung der Hautgruppen zeigt sich zwar ein signifikant höherer Wert der Yaw-Achse für die Kontrollgruppe beim langsamen Gehen, jedoch kann hier keine Normalverteilung angenommen werden.

## 5.3.5 IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich

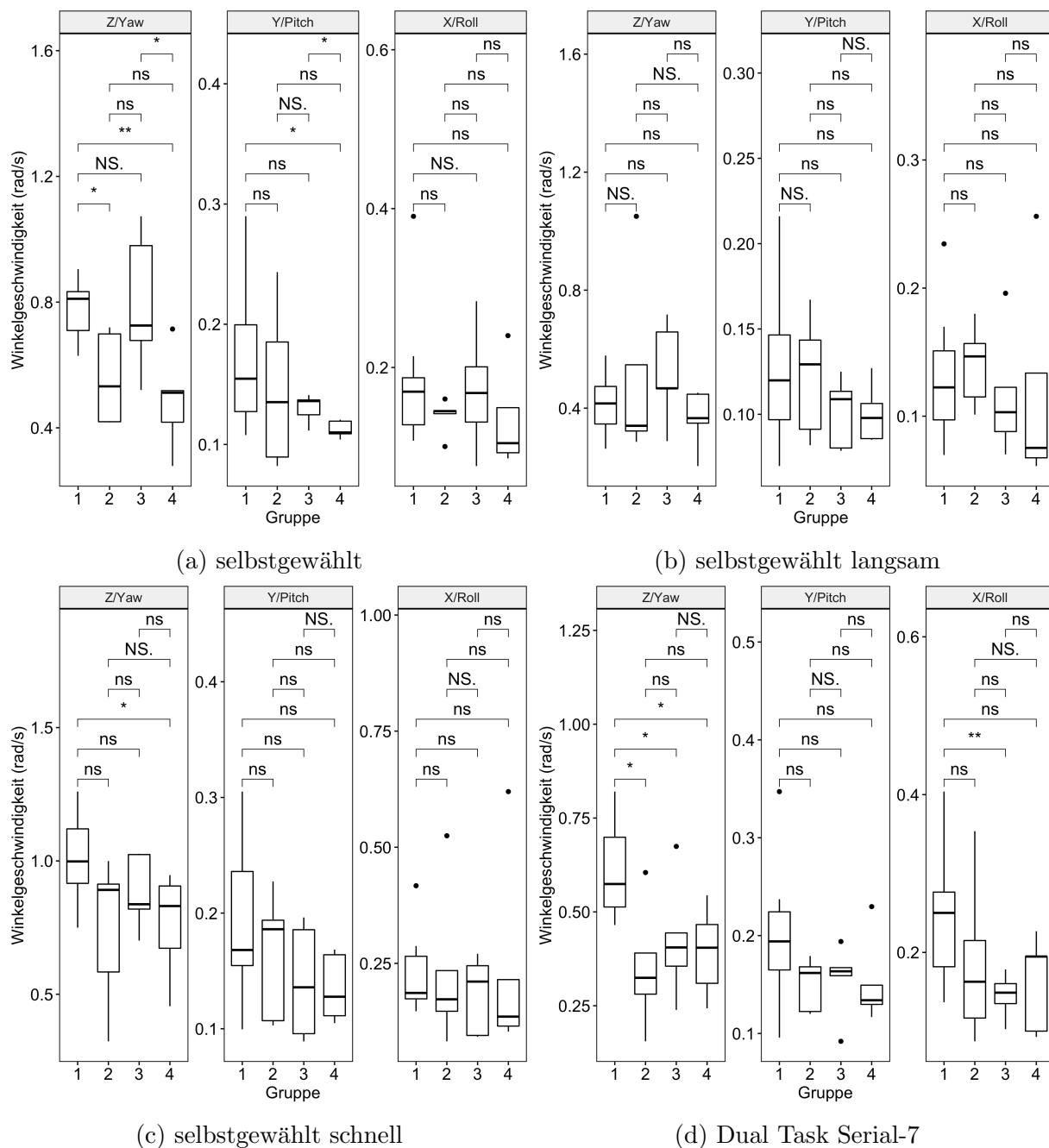


Abbildung 5.19: Absolute median Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.776	0.086	0.689	1	0.416	0.109	0.847
1	0.17	0.058	0.183	1	0.13	0.049	0.665
1	0.183	0.085	0.011	1	0.13	0.051	0.588
2	0.557	0.146	0.167	2	0.509	0.319	0.051
2	0.147	0.068	0.546	2	0.123	0.036	0.667
2	0.139	0.023	0.11	2	0.14	0.032	0.821
3	0.795	0.227	0.69	3	0.519	0.171	0.639
3	0.13	0.012	0.328	3	0.101	0.021	0.288
3	0.172	0.078	0.983	3	0.116	0.049	0.362
4	0.488	0.159	0.879	4	0.364	0.101	0.298
4	0.113	0.007	0.395	4	0.1	0.017	0.403
4	0.134	0.064	0.129	4	0.119	0.082	0.063

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.021	0.168	0.578	1	0.608	0.127	0.199
1	0.191	0.069	0.782	1	0.201	0.071	0.661
1	0.222	0.088	0.035	1	0.244	0.079	0.635
2	0.742	0.282	0.306	2	0.351	0.166	0.823
2	0.163	0.056	0.261	2	0.15	0.027	0.199
2	0.232	0.172	0.153	2	0.187	0.105	0.501
3	0.882	0.141	0.338	3	0.424	0.16	0.689
3	0.141	0.049	0.307	3	0.155	0.038	0.193
3	0.183	0.084	0.187	3	0.145	0.028	0.923
4	0.762	0.201	0.449	4	0.394	0.12	0.933
4	0.135	0.029	0.257	4	0.152	0.045	0.061
4	0.238	0.218	0.012	4	0.162	0.061	0.158

Tabelle 5.20: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Signifikante Unterschiede finden sich hier für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $0.776 \pm 0.086 [rad/s]$ ) und 2 ( $0.557 \pm 0.146 [rad/s]$ ) sowie 1 und 4 ( $0.488 \pm 0.159 [rad/s]$ ) als auch 3 ( $0.795 \pm 0.227 [rad/s]$ ) und 4. Für die Pitch-Achse der Gruppen 1 ( $0.17 \pm 0.058 [rad/s]$ ) und 4 ( $0.113 \pm 0.007 [rad/s]$ ) sowie 3 ( $0.13 \pm 0.012 [rad/s]$ ) und 4 beim langsamen Gehen. Beim schnellen Gehen für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $1.021 \pm 0.168 [rad/s]$ ) und 4 ( $0.762 \pm 0.201 [rad/s]$ ). Beim Dual-

Task für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $0.608 \pm 0.127[\text{rad/s}]$ ), 2 ( $0.351 \pm 0.166[\text{rad/s}]$ ), 3 ( $0.424 \pm 0.16[\text{rad/s}]$ ) und 4 ( $0.394 \pm 0.12[\text{rad/s}]$ ) sowie für die Roll-Achse der Gruppen 1 ( $0.244 \pm 0.079[\text{rad/s}]$ ) und 3 ( $0.145 \pm 0.028[\text{rad/s}]$ )

### 5.3.6 IMU Rumpfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

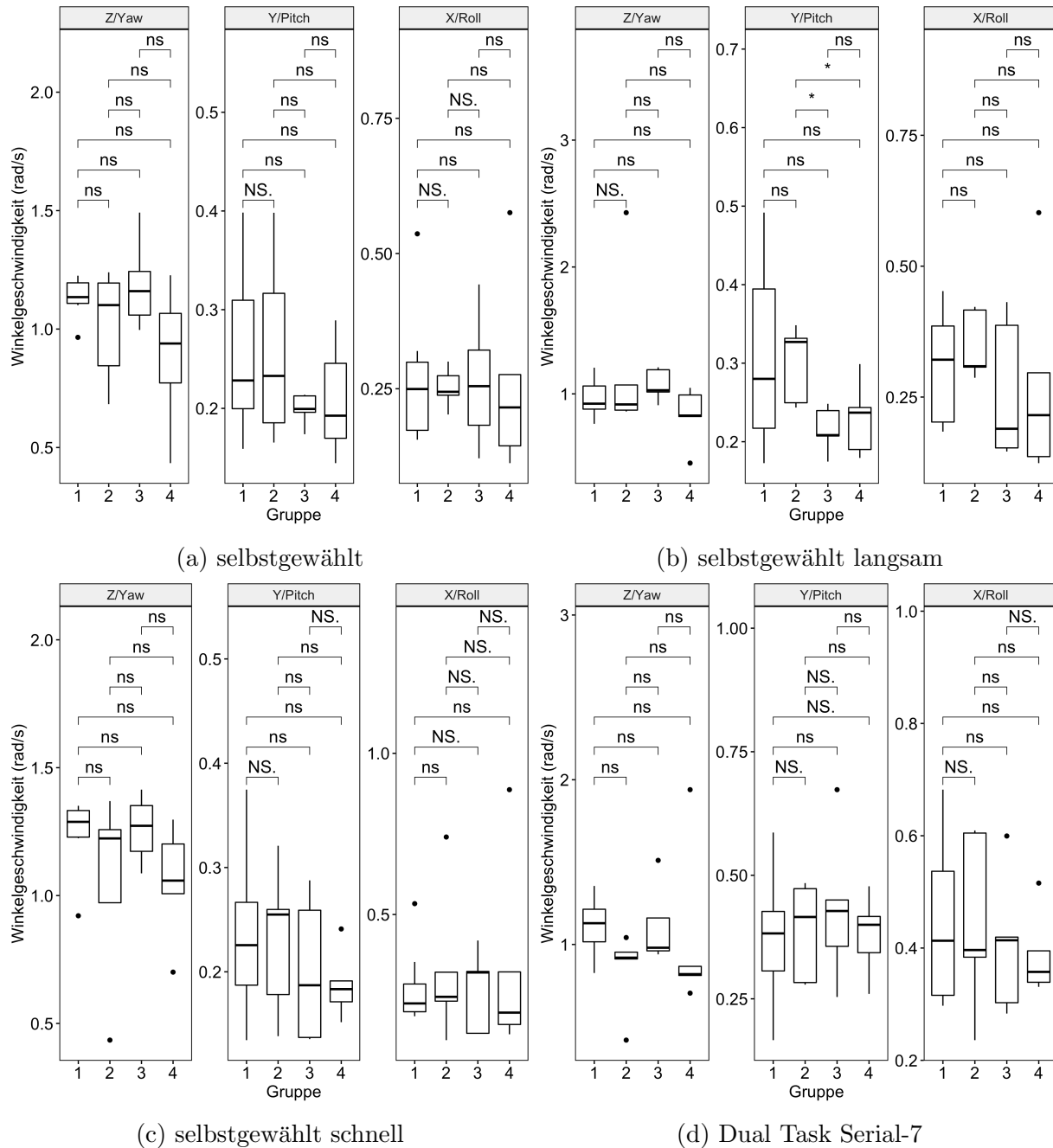


Abbildung 5.20: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.135	0.077	0.192	1	0.972	0.139	0.878
1	0.249	0.078	0.416	1	0.31	0.117	0.426
1	0.269	0.118	0.067	1	0.308	0.102	0.368
2	1.013	0.239	0.413	2	1.23	0.675	0.003
2	0.26	0.097	0.564	2	0.3	0.049	0.11
2	0.252	0.037	0.951	2	0.348	0.065	0.068
3	1.19	0.193	0.628	3	1.071	0.126	0.444
3	0.199	0.016	0.369	3	0.216	0.029	0.63
3	0.265	0.125	0.935	3	0.261	0.137	0.095
4	0.888	0.303	0.873	4	0.829	0.231	0.323
4	0.208	0.059	0.764	4	0.23	0.048	0.621
4	0.265	0.185	0.172	4	0.275	0.196	0.139

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.248	0.133	0.003	1	1.102	0.177	0.619
1	0.232	0.074	0.877	1	0.371	0.134	0.874
1	0.274	0.111	0.012	1	0.442	0.133	0.442
2	1.051	0.374	0.197	2	0.849	0.246	0.025
2	0.23	0.072	0.763	2	0.387	0.1	0.134
2	0.329	0.242	0.138	2	0.446	0.16	0.348
3	1.26	0.132	0.889	3	1.111	0.24	0.068
3	0.201	0.07	0.294	3	0.432	0.155	0.708
3	0.265	0.129	0.22	3	0.404	0.126	0.388
4	1.053	0.228	0.701	4	1.029	0.513	0.004
4	0.188	0.033	0.579	4	0.38	0.082	0.91
4	0.338	0.316	0.025	4	0.388	0.076	0.098

Tabelle 5.21: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Die Geschwindigkeitskorrelation der Daten zeigt lediglich noch für die Pitch-Achse der Gruppen 2 ( $0.3 \pm 0.049[\text{rad/s}]$ ), 3 ( $0.216 \pm 0.029[\text{rad/s}]$ ) sowie 4 ( $0.23 \pm 0.048[\text{rad/s}]$ ) beim langsamen Gehen signifikante Unterschiede.



## 5.3.7 IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich

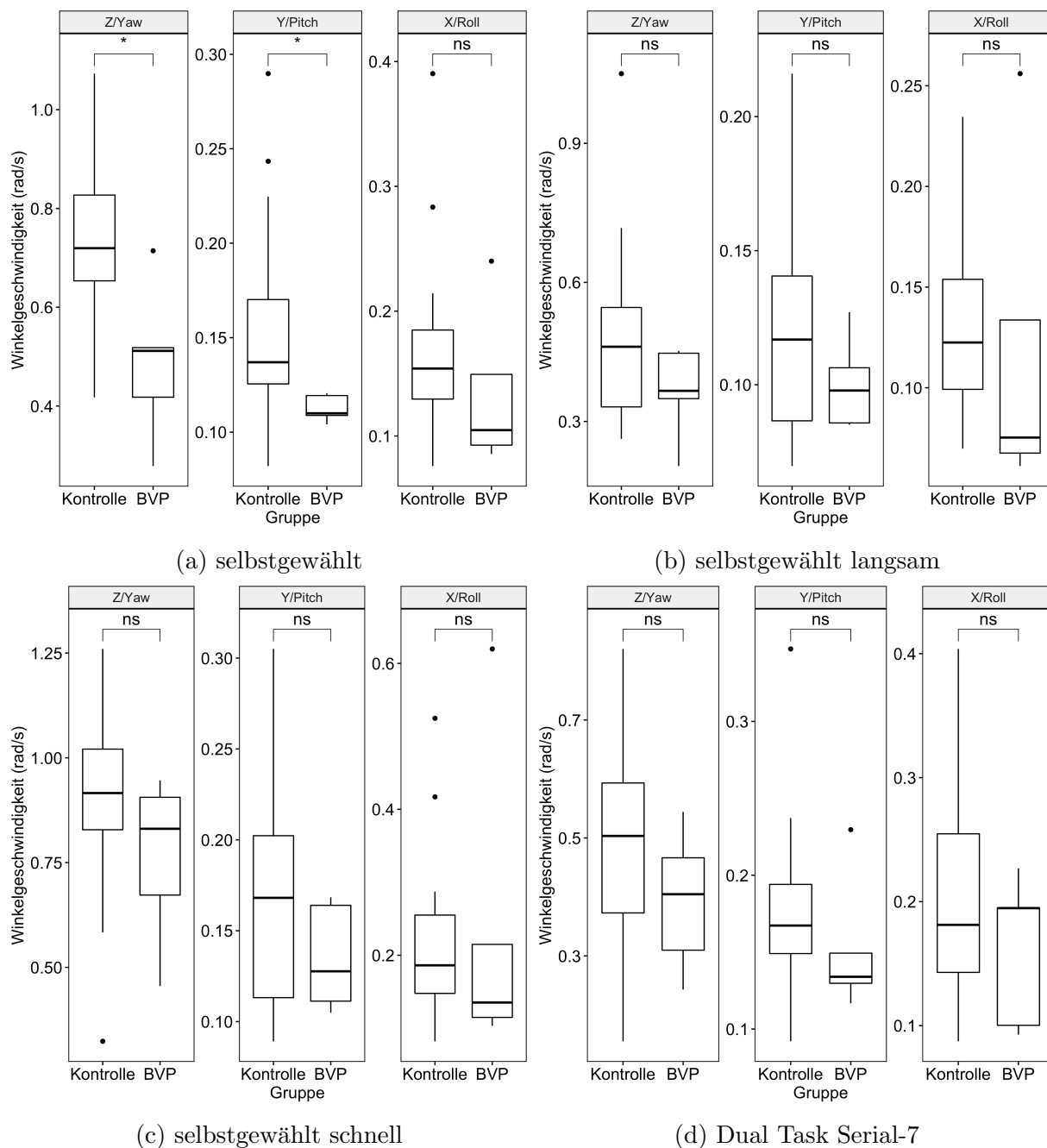


Abbildung 5.21: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.723	0.173	0.714	1	0.468	0.192	0.008
1	0.154	0.053	0.047	1	0.12	0.04	0.209
1	0.169	0.071	0.004	1	0.129	0.045	0.465
4	0.488	0.159	0.879	4	0.364	0.101	0.298
4	0.113	0.007	0.395	4	0.1	0.017	0.403
4	0.134	0.064	0.129	4	0.119	0.082	0.063

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.911	0.221	0.215	1	0.492	0.18	0.998
1	0.171	0.062	0.372	1	0.176	0.058	0.046
1	0.214	0.11	0.014	1	0.203	0.085	0.222
4	0.762	0.201	0.449	4	0.394	0.12	0.933
4	0.135	0.029	0.257	4	0.152	0.045	0.061
4	0.238	0.218	0.012	4	0.162	0.061	0.158

Tabelle 5.22: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Der Hauptgruppenvergleich zeigt signifikante Unterschiede der Yaw-Achse ( $0.723 \pm 0.173 [rad/s]$  vs.  $0.488 \pm 0.159 [rad/s]$ ) sowie Pitch-Achse ( $0.154 \pm 0.053 [rad/s]$  vs.  $0.133 \pm 0.007 [rad/s]$ ) beim selbstgewählten Gehen wobei für den letzten Fall keine Normalverteilung angenommen werden kann.

### 5.3.8 IMU Rumpfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

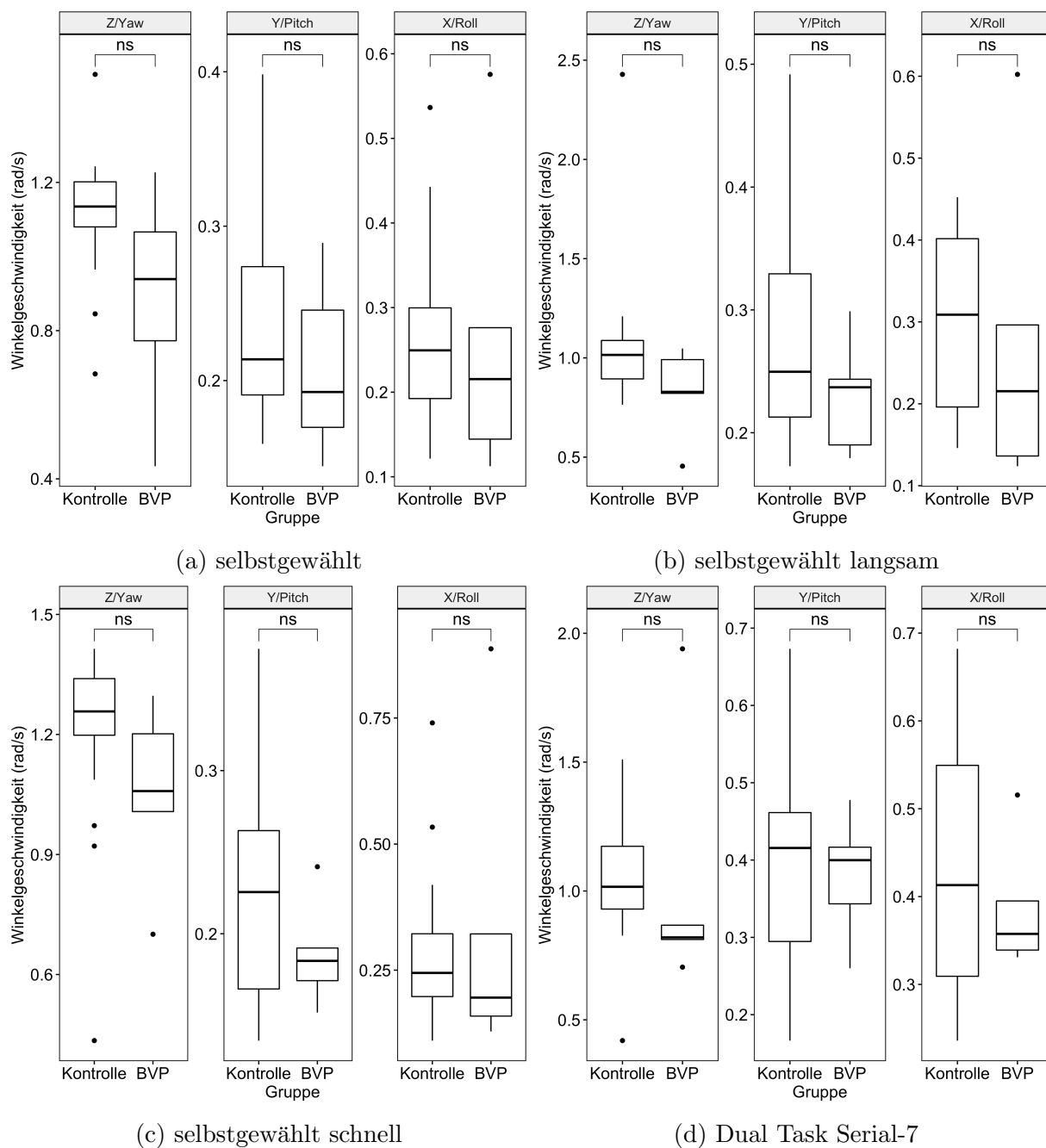


Abbildung 5.22: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.117	0.168	0.092	1	1.066	0.354	0
1	0.239	0.074	0.006	1	0.283	0.092	0.088
1	0.264	0.1	0.06	1	0.306	0.104	0.088
4	0.888	0.303	0.873	4	0.829	0.231	0.323
4	0.208	0.059	0.764	4	0.23	0.048	0.621
4	0.265	0.185	0.172	4	0.275	0.196	0.139

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	1.2	0.226	0	1	1.038	0.231	0.372
1	0.223	0.07	0.259	1	0.391	0.127	0.908
1	0.286	0.151	0.007	1	0.433	0.132	0.204
4	1.053	0.228	0.701	4	1.029	0.513	0.004
4	0.188	0.033	0.579	4	0.38	0.082	0.91
4	0.338	0.316	0.025	4	0.388	0.076	0.098

Tabelle 5.23: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrelation der Daten zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen mehr.

## 5.3.9 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich

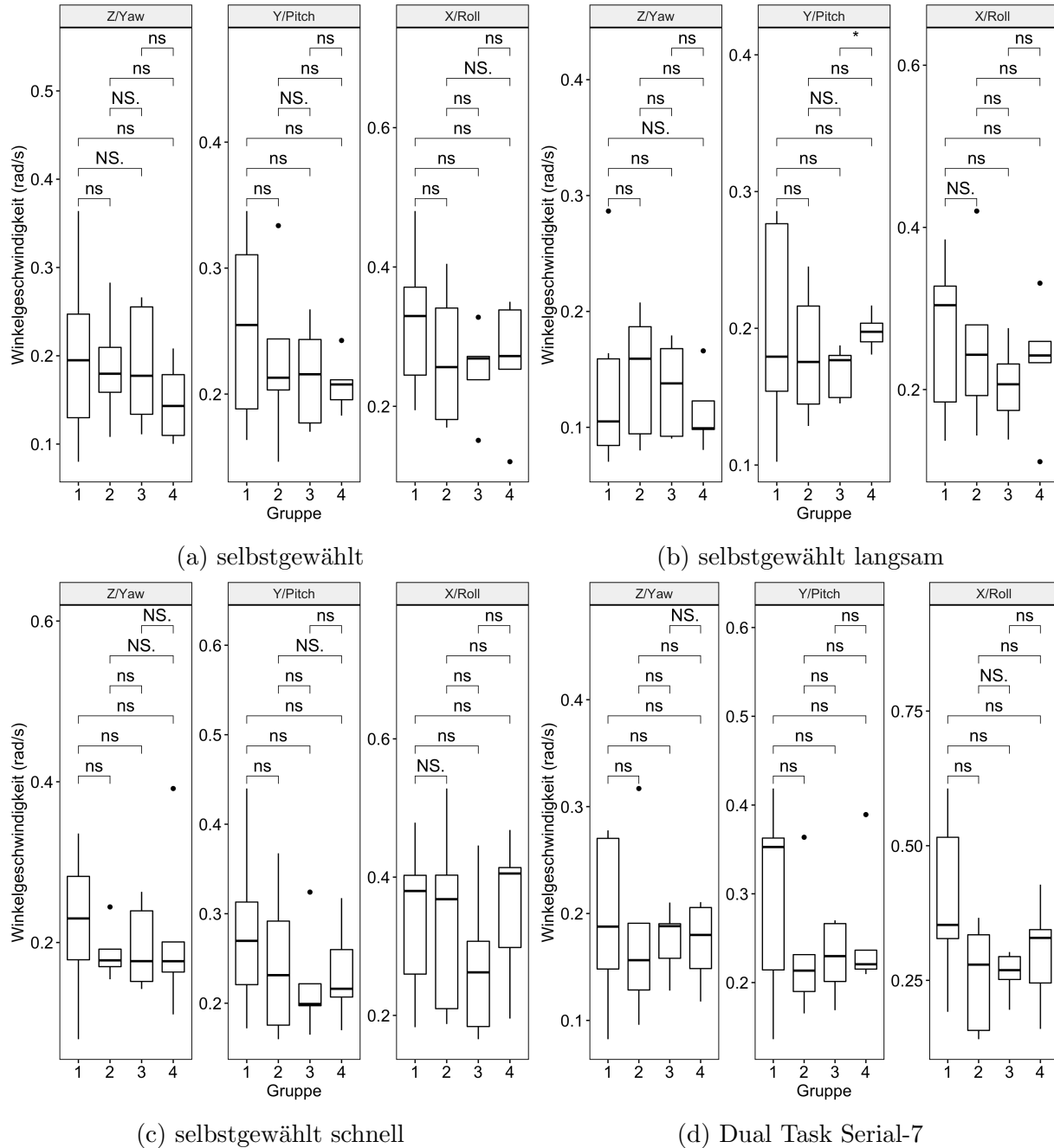


Abbildung 5.23: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.205	0.096	0.76	1	0.13	0.068	0.036
1	0.251	0.068	0.5	1	0.193	0.073	0.139
1	0.317	0.095	0.756	1	0.263	0.091	0.2
2	0.188	0.065	0.951	2	0.146	0.056	0.45
2	0.228	0.069	0.758	2	0.182	0.049	0.735
2	0.27	0.102	0.518	2	0.256	0.105	0.715
3	0.189	0.07	0.378	3	0.134	0.041	0.278
3	0.215	0.042	0.589	3	0.168	0.019	0.227
3	0.251	0.065	0.659	3	0.205	0.053	0.996
4	0.148	0.046	0.651	4	0.113	0.033	0.416
4	0.208	0.022	0.728	4	0.198	0.014	0.994
4	0.267	0.092	0.357	4	0.235	0.079	0.544

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.226	0.078	0.852	1	0.198	0.068	0.472
1	0.287	0.09	0.395	1	0.303	0.101	0.309
1	0.336	0.108	0.456	1	0.396	0.136	0.857
2	0.188	0.034	0.366	2	0.178	0.085	0.413
2	0.245	0.086	0.64	2	0.233	0.077	0.171
2	0.339	0.142	0.579	2	0.256	0.102	0.335
3	0.195	0.054	0.347	3	0.175	0.032	0.668
3	0.221	0.061	0.171	3	0.227	0.043	0.554
3	0.273	0.112	0.541	3	0.263	0.043	0.489
4	0.209	0.107	0.137	4	0.172	0.039	0.549
4	0.234	0.057	0.811	4	0.254	0.076	0.004
4	0.356	0.109	0.541	4	0.301	0.102	0.918

Tabelle 5.24: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei einem Vergleich der Differenzen der Winkelgeschwindigkeiten von Kopf und Rumpf ergibt sich beim langsamen Gehen lediglich für die Pitch-Achse der Gruppe 4 ( $0.198 \pm 0.014 [rad/s]$ ) ein signifikant höherer Wert im Vergleich zur Gruppe 3 ( $0.168 \pm 0.019 [rad/s]$ ).

### 5.3.10 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

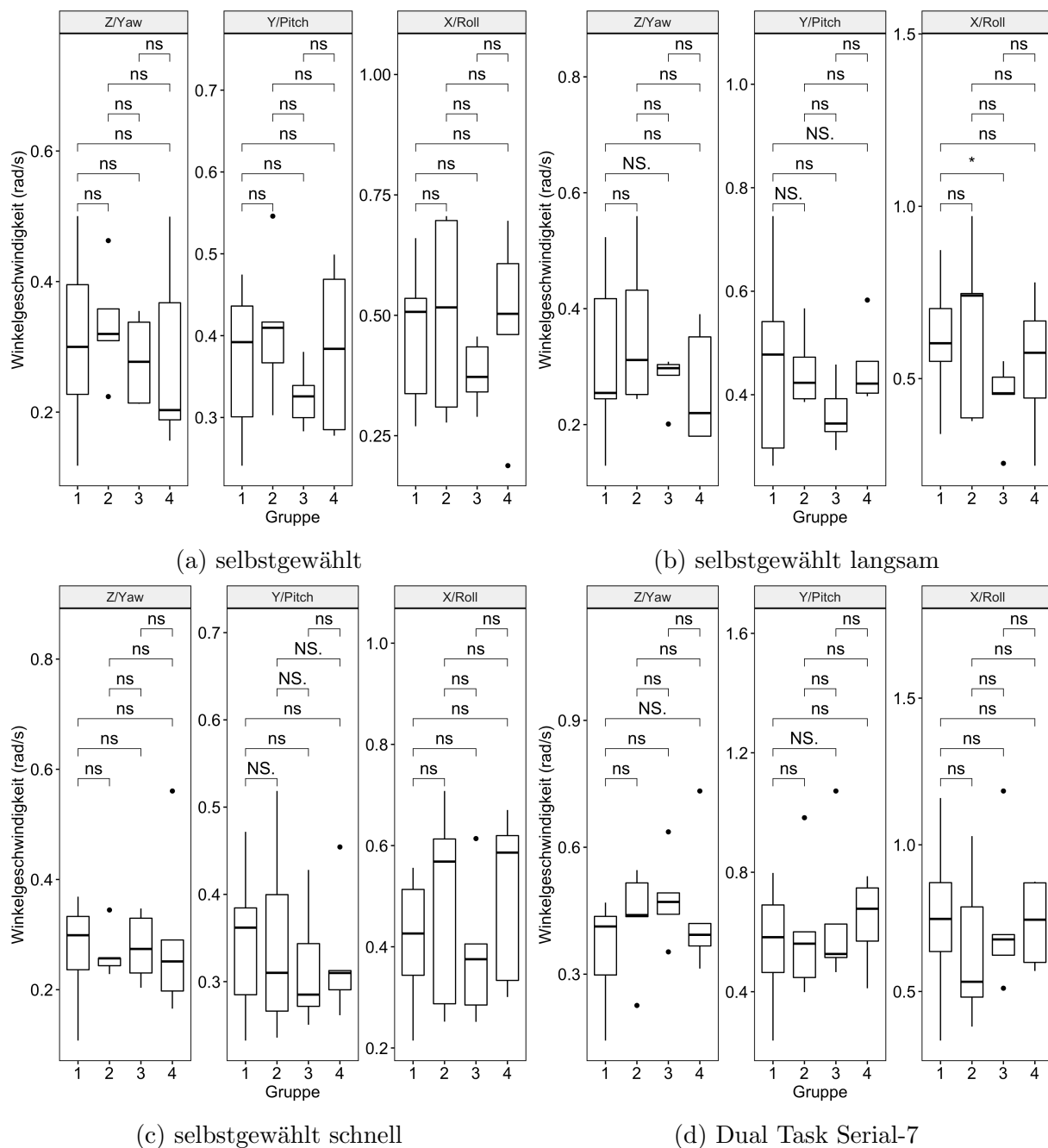


Abbildung 5.24: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.3	0.132	0.834	1	0.305	0.129	0.654
1	0.366	0.087	0.324	1	0.459	0.17	0.503
1	0.468	0.143	0.449	1	0.61	0.152	0.994
2	0.335	0.087	0.851	2	0.36	0.135	0.328
2	0.408	0.089	0.707	2	0.448	0.075	0.281
2	0.501	0.204	0.213	2	0.644	0.257	0.298
3	0.279	0.067	0.254	3	0.279	0.045	0.017
3	0.326	0.037	0.89	3	0.363	0.064	0.794
3	0.378	0.068	0.801	3	0.444	0.113	0.198
4	0.283	0.146	0.235	4	0.264	0.1	0.137
4	0.383	0.102	0.324	4	0.454	0.077	0.097
4	0.491	0.193	0.652	4	0.542	0.206	0.931

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.274	0.085	0.519	1	0.36	0.116	0.047
1	0.347	0.08	0.682	1	0.557	0.192	0.363
1	0.411	0.12	0.444	1	0.732	0.265	0.804
2	0.266	0.045	0.06	2	0.433	0.125	0.23
2	0.346	0.114	0.555	2	0.598	0.23	0.205
2	0.486	0.204	0.288	2	0.642	0.264	0.531
3	0.277	0.062	0.621	3	0.479	0.103	0.745
3	0.316	0.072	0.369	3	0.641	0.248	0.031
3	0.386	0.142	0.424	3	0.738	0.259	0.082
4	0.293	0.157	0.122	4	0.445	0.166	0.05
4	0.326	0.075	0.078	4	0.639	0.151	0.612
4	0.502	0.172	0.16	4	0.732	0.144	0.224

Tabelle 5.25: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrektur der Daten ist der Unterschied, der sich beim reinen Untergruppenvergleich zeigt, nicht mehr vorhanden. Jedoch ergibt sich hier ein einzelner signifikanter Unterschied für die Roll-Achse beim langsamen Gehen mit einer geringeren Winkelgeschwindigkeit für die Gruppe 3 ( $0.444 \pm 0.113$  [rad/s]) im Vergleich zur Gruppe 1 ( $0.61 \pm 0.152$  [rad/s]).



## 5.3.11 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich

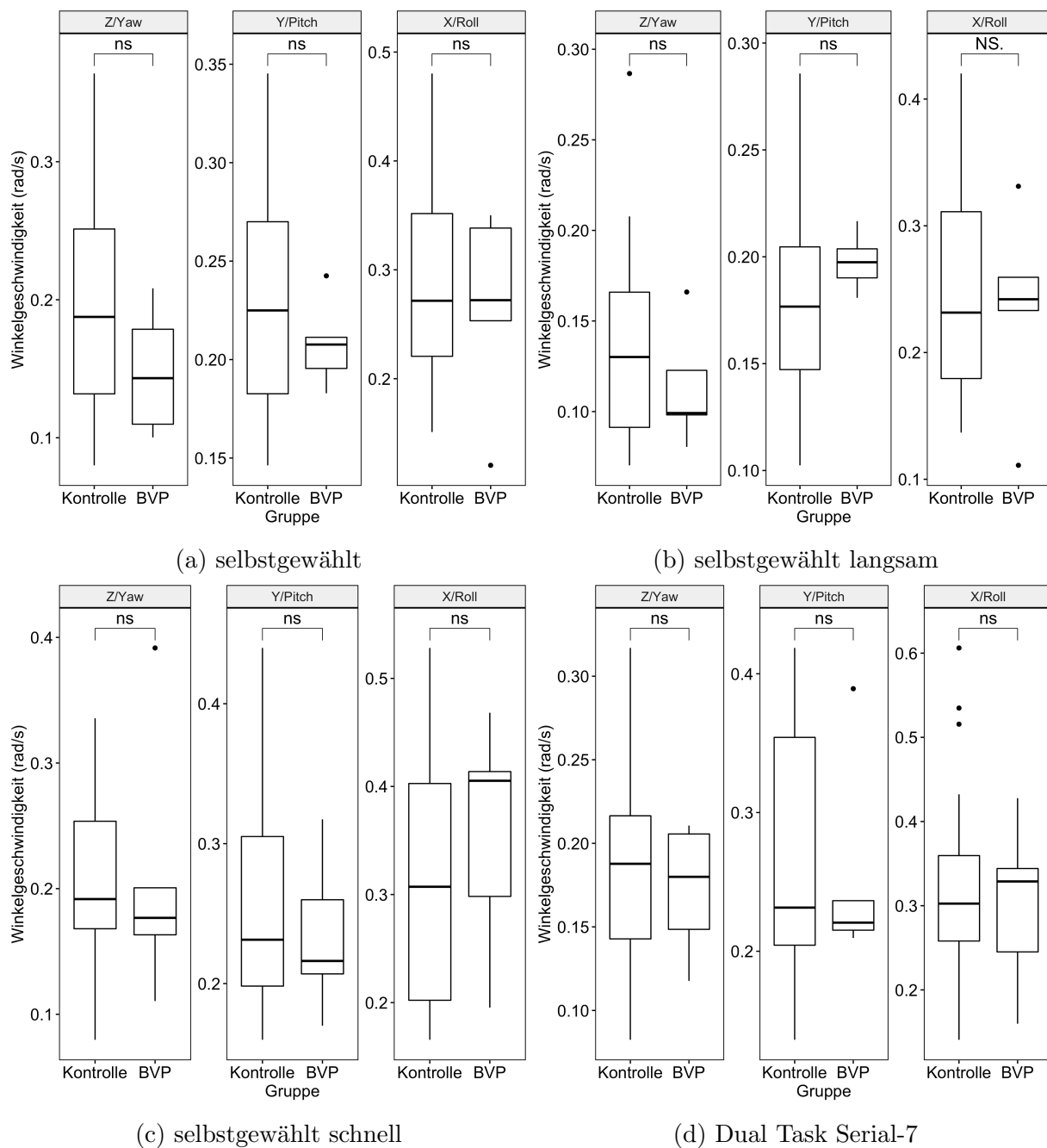


Abbildung 5.25: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.196	0.079	0.697	1	0.135	0.057	0.042
1	0.235	0.061	0.317	1	0.183	0.056	0.102
1	0.288	0.09	0.739	1	0.246	0.086	0.235
4	0.148	0.046	0.651	4	0.113	0.033	0.416
4	0.208	0.022	0.728	4	0.198	0.014	0.994
4	0.267	0.092	0.357	4	0.235	0.079	0.544

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.207	0.063	0.767	1	0.186	0.064	0.595
1	0.259	0.083	0.092	1	0.265	0.088	0.092
1	0.32	0.115	0.151	1	0.324	0.126	0.266
4	0.209	0.107	0.137	4	0.172	0.039	0.549
4	0.234	0.057	0.811	4	0.254	0.076	0.004
4	0.356	0.109	0.541	4	0.301	0.102	0.918

Tabelle 5.26: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Beim Hauptgruppenvergleich findet sich kein signifikanter Unterschied. Auch sind keine Tendenzen erkennbar.

### 5.3.12 IMU Rumpf-/Kopfsensor: Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

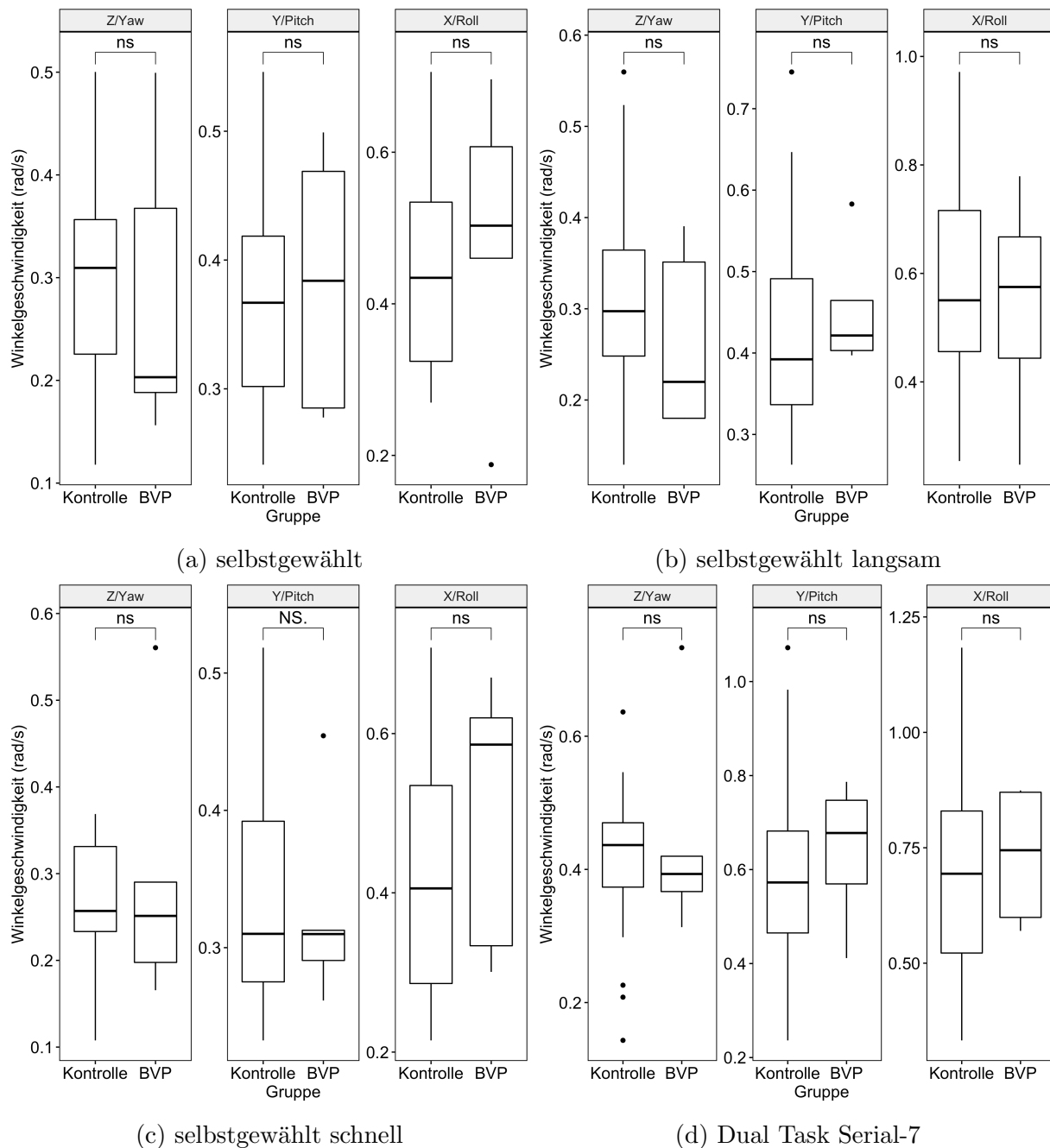


Abbildung 5.26: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.304	0.104	0.913	1	0.313	0.113	0.14
1	0.366	0.08	0.832	1	0.431	0.129	0.249
1	0.453	0.148	0.082	1	0.576	0.186	0.957
4	0.283	0.146	0.235	4	0.264	0.1	0.137
4	0.383	0.102	0.324	4	0.454	0.077	0.097
4	0.491	0.193	0.652	4	0.542	0.206	0.931

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	0.273	0.067	0.37	1	0.41	0.121	0.165
1	0.338	0.084	0.17	1	0.59	0.207	0.462
1	0.424	0.147	0.326	1	0.71	0.252	0.545
4	0.293	0.157	0.122	4	0.445	0.166	0.05
4	0.326	0.075	0.078	4	0.639	0.151	0.612
4	0.502	0.172	0.16	4	0.732	0.144	0.224

Tabelle 5.27: Absolute mediane Winkelgeschwindigkeit im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrelation der Daten ändert sich das Bild ebenfalls nicht.



## 5.4 Reids Plane

### 5.4.1 Hauptgruppenvergleich

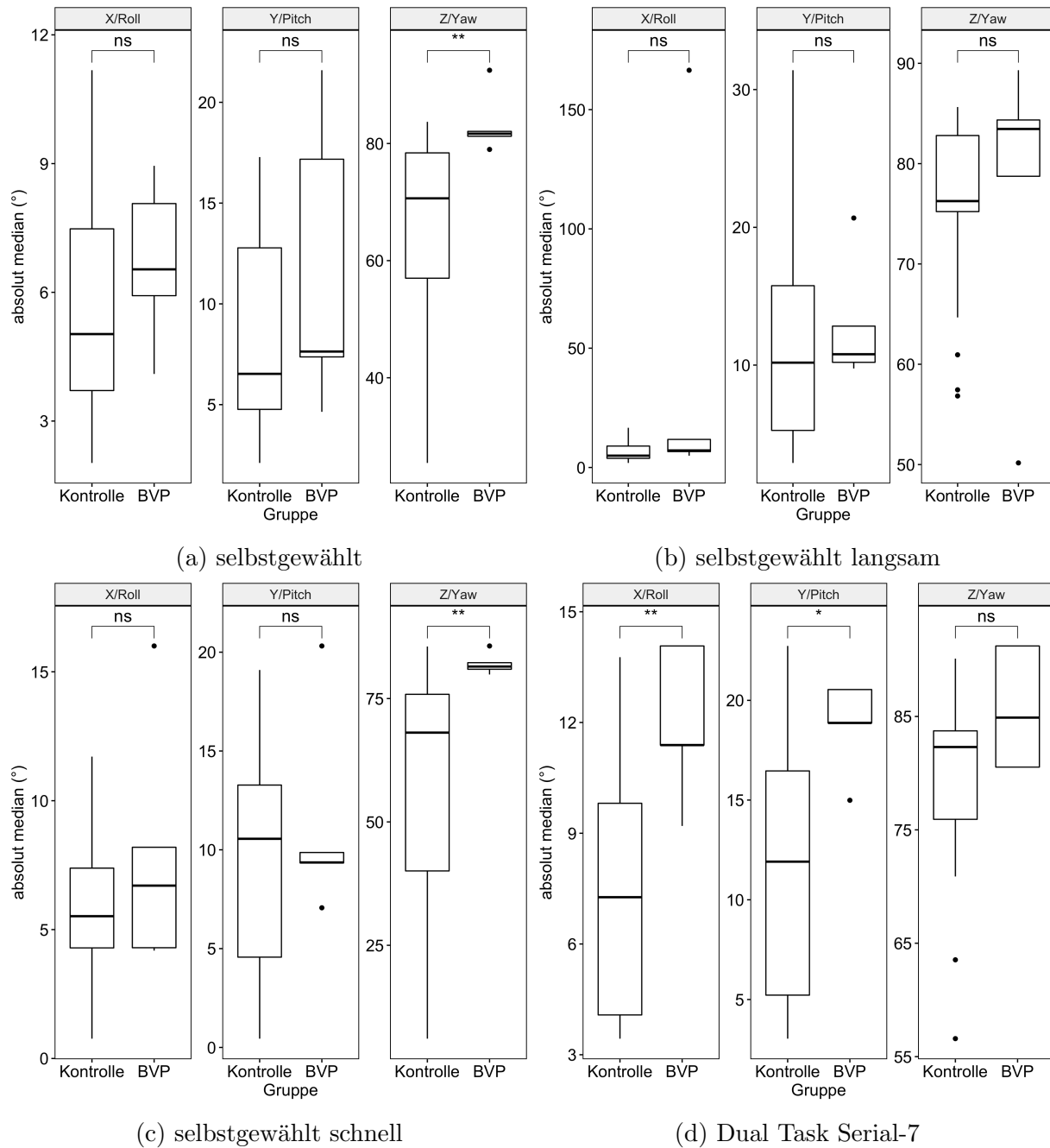


Abbildung 5.27: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	5.842	2.732	0.111	1	6.839	4.211	0.026
1	8.861	5.017	0.07	1	11.557	7.658	0.071
1	65.349	16.44	0.031	1	75.395	9.074	0.006
4	6.714	1.892	0.918	4	39.402	71.092	0
4	11.684	7.295	0.277	4	12.851	4.53	0.036
4	83.296	5.286	0.033	4	77.205	15.573	0.047

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	5.951	2.875	0.257	1	7.135	3.27	0.055
1	9.629	5.569	0.378	1	11.467	6.544	0.054
1	59.148	22.962	0.022	1	79.026	8.532	0.031
4	7.877	4.846	0.124	4	12.024	2.073	0.306
4	11.189	5.215	0.021	4	18.762	2.268	0.105
4	82.046	2.195	0.384	4	85.681	5.36	0.108

Tabelle 5.28: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Beim Hauptgruppenvergleich zeigen sich signifikante Unterschiede beim selbst gewählten Gehen für die Yaw-Achse ( $65.349 \pm 16.44$  [deg] vs.  $83.296 \pm 5.286$  [deg]) sowie für die Yaw-Achse beim schnellen Gehen ( $59.148 \pm 22.962$  [rad/s] vs.  $82.046 \pm 2.195$  [rad/s]) und für die Roll-Achse ( $5.951 \pm 2.875$  [rad/s] vs.  $7.877 \pm 4.846$  [rad/s]) sowie Pitch-Achse ( $11.467 \pm 6.544$  [rad/s] vs.  $18.762 \pm 2.268$  [rad/s]) beim Dual Task.

## 5.4.2 Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

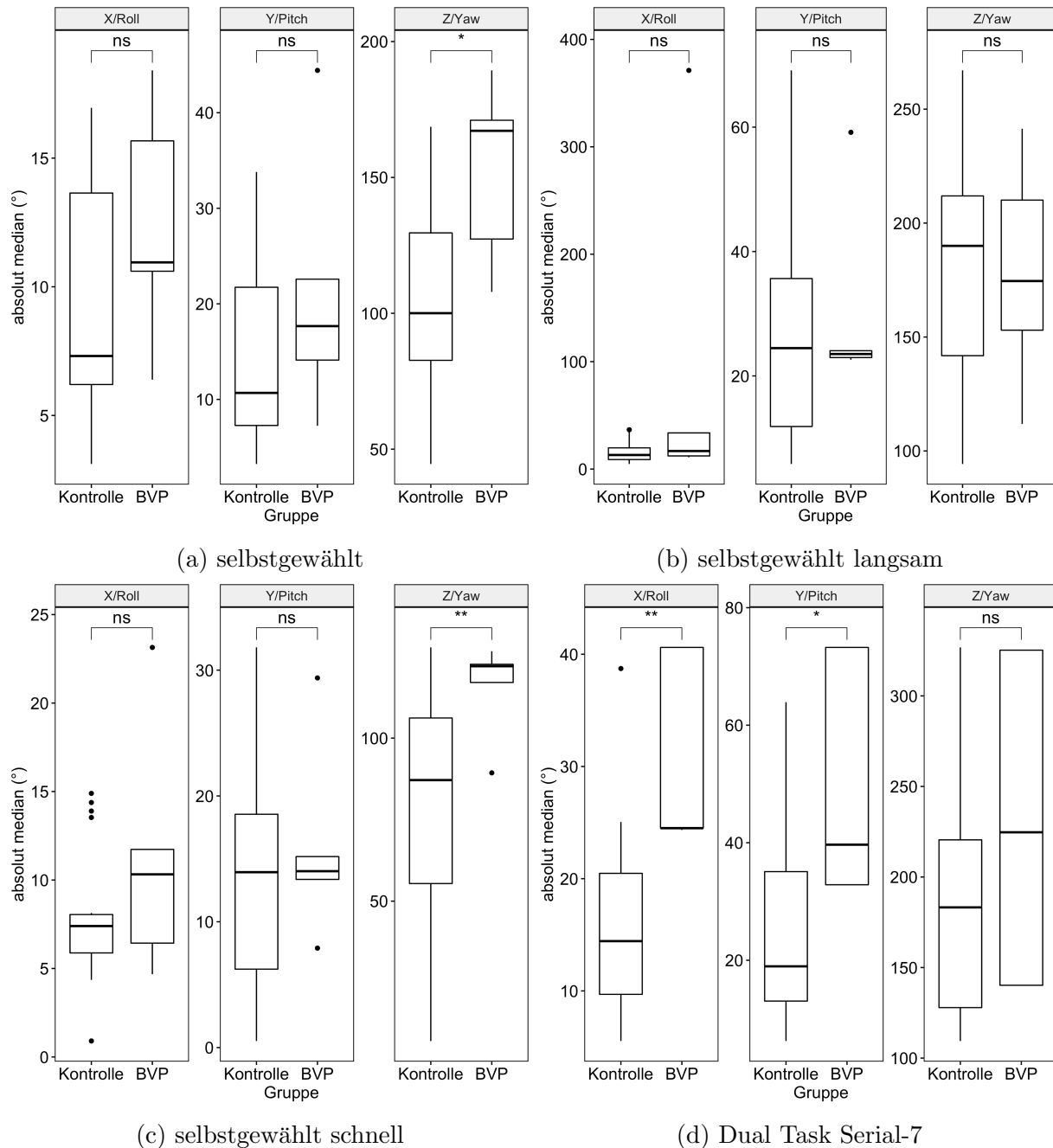


Abbildung 5.28: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie



Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	9.168	4.19	0.066	1	15.983	9.564	0.027
1	14.262	8.695	0.132	1	26.928	17.163	0.187
1	104.843	35.448	0.892	1	183.139	49.764	0.633
4	12.405	4.697	0.817	4	88.957	158.016	0.001
4	21.208	14.132	0.389	4	30.462	16.056	0
4	152.562	33.698	0.543	4	178.175	50.148	0.985

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	7.912	3.749	0.026	1	16.012	8.205	0.075
1	13.132	8.196	0.221	1	25.579	16.01	0.082
1	79.724	33.246	0.293	1	182.709	61.606	0.093
4	11.262	7.226	0.304	4	30.914	8.849	0.007
4	15.97	8.002	0.179	4	50.372	21.058	0.033
4	115.535	15.027	0.033	4	231.128	92.57	0.116

Tabelle 5.29: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrelation zeigt sich weiterhin ein signifikanter Unterschied für die Yaw-Achse beim selbst gewählten- ( $104.843 \pm 35.448 [rad/s]$  vs.  $152.562 \pm 33.698 [rad/s]$ ) sowie schnellen- ( $79.724 \pm 33.246 [rad/s]$  vs.  $115.535 \pm 15.027 [rad/s]$ ) Gehen und Dual-Task ( $182.709 \pm 61.606 [rad/s]$  vs.  $231.128 \pm 92.57 [rad/s]$ ) mit hier zusätzlich auch Pitch-Achse ( $25.579 \pm 16.01 [rad/s]$  vs.  $50.372 \pm 21.058 [rad/s]$ )

## 5.4.3 Untergruppenvergleich

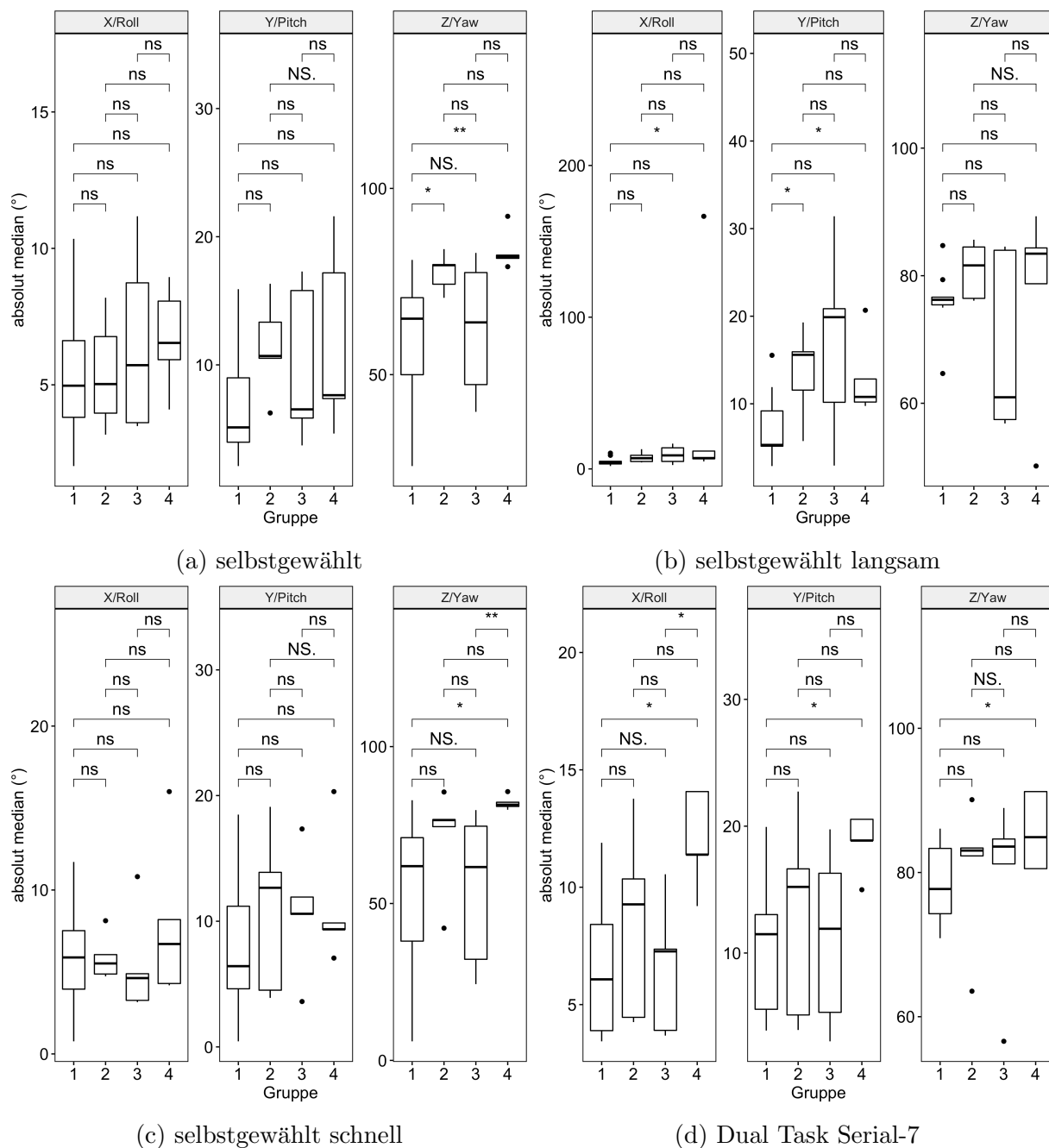


Abbildung 5.29: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	5.682	2.94	0.27	1	4.974	2.826	0.049
1	6.895	4.605	0.176	1	7.353	4.212	0.255
1	60.296	17.248	0.322	1	76.051	5.217	0.049
2	5.425	2.049	0.786	2	7.642	3.512	0.559
2	11.424	3.735	0.907	2	13.626	5.183	0.664
2	77.504	5.085	0.776	2	80.856	4.438	0.274
3	6.547	3.349	0.396	3	9.393	5.891	0.742
3	9.836	6.229	0.163	3	17.056	10.891	0.894
3	62.291	18.482	0.582	3	68.753	14.249	0.036
4	6.714	1.892	0.918	4	39.402	71.092	0
4	11.684	7.295	0.277	4	12.851	4.53	0.036
4	83.296	5.286	0.033	4	77.205	15.573	0.047

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	6.333	3.506	0.875	1	6.745	3.214	0.194
1	8.317	5.745	0.716	1	10.883	6.149	0.169
1	55.089	24.748	0.256	1	78.24	5.45	0.567
2	5.862	1.372	0.219	2	8.421	4.065	0.453
2	10.813	6.499	0.436	2	12.725	8.01	0.459
2	71.096	16.738	0.046	2	80.476	9.974	0.092
3	5.353	3.151	0.033	3	6.552	2.847	0.409
3	10.805	4.896	0.616	3	11.262	7.08	0.686
3	54.505	25.001	0.339	3	78.991	12.833	0.035
4	7.877	4.846	0.124	4	12.024	2.073	0.306
4	11.189	5.215	0.021	4	18.762	2.268	0.105
4	82.046	2.195	0.384	4	85.681	5.36	0.108

Tabelle 5.30: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Für den Untergruppenvergleich ergibt sich ein signifikanter Unterschied der Yaw-Achse für die Gruppen 1 ( $60.295 \pm 17.248$  [deg]) und 2 ( $77.504 \pm 5.085$  [deg]) sowie 1 und 4 ( $83.296 \pm 5.286$  [deg]) beim selbst gewählten Gehen. Beim langsamen Gehen für die Pitch-Achse der Gruppen 1 ( $7.353 \pm 4.212$  [deg]) und 2 ( $13.626 \pm 5.183$  [deg]). Beim schnellen Gehen für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $55.089 \pm 24.748$  [deg]) und 4 ( $82.046 \pm 2.195$  [deg]) sowie 3

( $54.505 \pm 25.001$  [deg]) und 4. Beim Dual-Task für die Roll-Achse der Gruppen 1 ( $6.745 \pm 3.214$  [deg]) und 4 ( $12.024 \pm 2.073$  [deg]) sowie 3 ( $6.552 \pm 2.847$  [deg]) und 4, für die Pitch-Achse der Gruppen 1 ( $10.883 \pm 6.149$  [deg]) und 4 ( $18.762 \pm 2.268$  [deg]) sowie Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $78.24 \pm 5.45$  [deg]) und 4 ( $85.681 \pm 5.36$  [deg])

5.4.4 Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

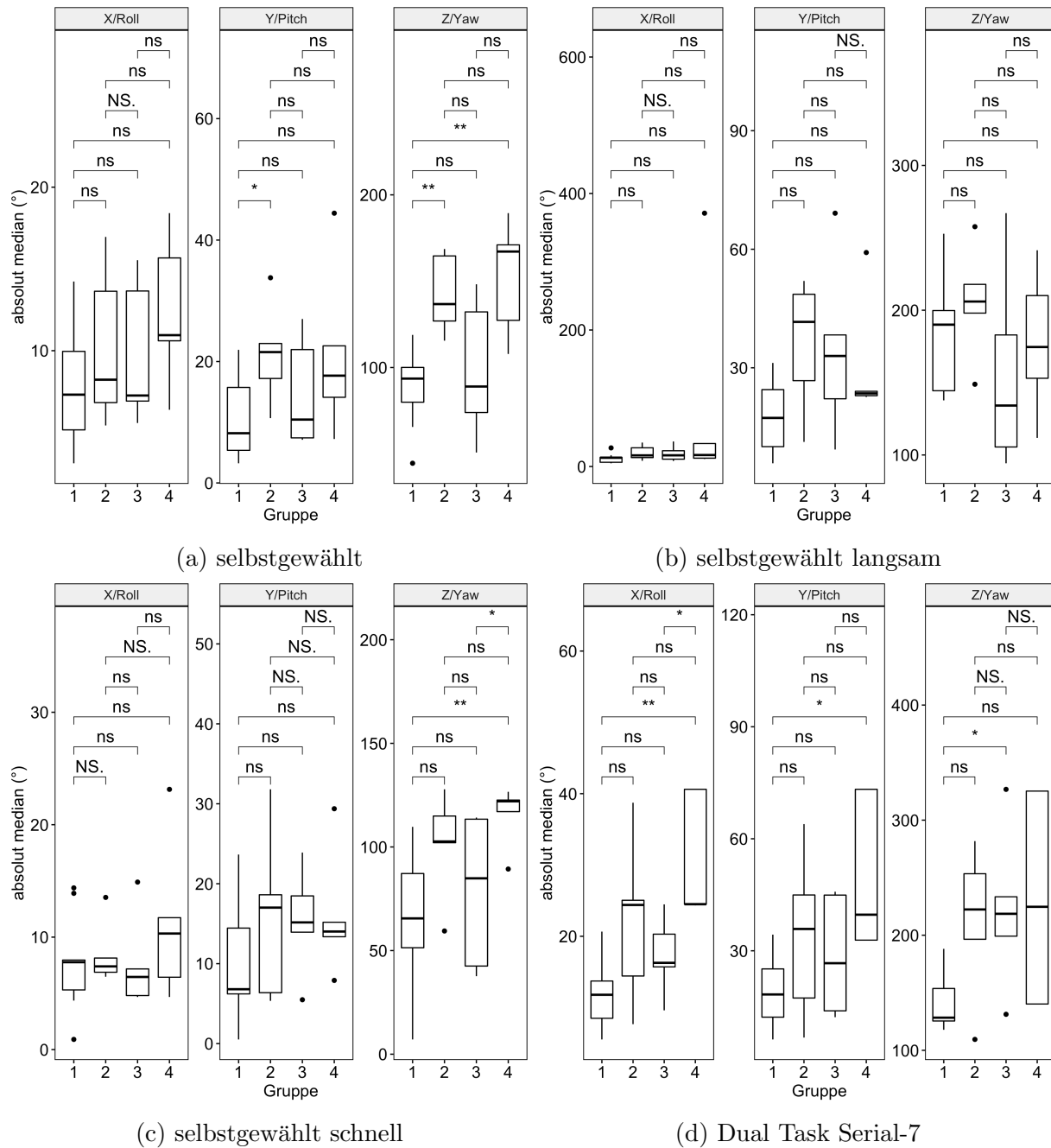


Abbildung 5.30: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	8.242	3.956	0.438	1	12.063	6.972	0.149
1	10.094	6.508	0.184	1	17.725	9.374	0.519
1	87.26	21.839	0.635	1	185.266	39.539	0.357
2	10.214	4.885	0.448	2	20.03	10.891	0.657
2	21.24	8.492	0.893	2	36.034	16.905	0.495
2	142.507	23.298	0.443	2	205.672	39.181	0.866
3	9.788	4.48	0.182	3	18.993	11.377	0.544
3	14.789	9.115	0.167	3	34.386	22.367	0.748
3	98.83	40.545	0.698	3	156.779	70.49	0.39
4	12.405	4.697	0.817	4	88.957	158.016	0.001
4	21.208	14.132	0.389	4	30.462	16.056	0
4	152.562	33.698	0.543	4	178.175	50.148	0.985

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	7.765	4.275	0.367	1	11.952	4.91	0.654
1	10.379	7.359	0.503	1	19.289	9.928	0.411
1	68.361	32.118	0.76	1	144.302	26.393	0.057
2	8.486	2.889	0.027	2	22.056	11.801	0.848
2	15.83	10.767	0.466	2	33.771	22.561	0.927
2	101.371	25.696	0.366	2	212.708	66.034	0.688
3	7.602	4.215	0.039	3	17.275	5.544	0.935
3	15.389	6.745	0.911	3	28.71	16.193	0.183
3	78.53	37.045	0.167	3	221.843	70.477	0.815
4	11.262	7.226	0.304	4	30.914	8.849	0.007
4	15.97	8.002	0.179	4	50.372	21.058	0.033
4	115.535	15.027	0.033	4	231.128	92.57	0.116

Tabelle 5.31: Absolut medianer Wert des Bewegungsumfanges der Reids Plane im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrelation der Daten zeigt sich für das selbst gewählte Gehen ein signifikanter Unterschied der Pitch-Achse für die Gruppen 1 ( $10.094 \pm 6.508$  [deg]) und 2 ( $10.214 \pm 4.885$  [deg]). Sowie für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $87.26 \pm 21.839$  [deg]) und 2 ( $142.507 \pm 23.298$  [deg]) sowie 1 und 4 ( $152.562 \pm 33.698$  [deg]). Beim schnellen Gehen für die Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $68.361 \pm 32.118$  [deg]) und 4 ( $115.535 \pm 15.027$  [deg])

sowie 3 ( $78.53 \pm 37.045$  [deg]) und 4. Beim Dual-Task für die Roll-Achse der Gruppen 1 ( $11.952 \pm 4.91$  [deg]) und 4 ( $30.914 \pm 8.849$  [deg]) sowie 3 ( $17.275 \pm 5.544$  [deg]) und 4 als auch für die Pitch-Achse der Gruppen 1 ( $19.289 \pm 9.928$  [deg]) und 4 ( $50.372 \pm 21.058$  [deg]) und Yaw-Achse der Gruppen 1 ( $144.302 \pm 26.393$  [deg]) und 3 ( $28.71 \pm 16.193$  [deg]).

## 5.5 Rumpf-Kopf-Position

Zum Vergleich der Bewegungsfreiheit von Kopf und Rumpf wurde die Position eines Markers des Kopfes (Tabelle 4.1 Nr. 11) von der Position des sternalen Markers (Tabelle 4.1 Nr. 8) subtrahiert. Die Zeitreihe wurde wiederum zur Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Körpergrößen mittels Subtraktion des Medians über die ersten 10 Frames der Aufnahme normiert.

5.5.1 Hauptgruppenvergleich

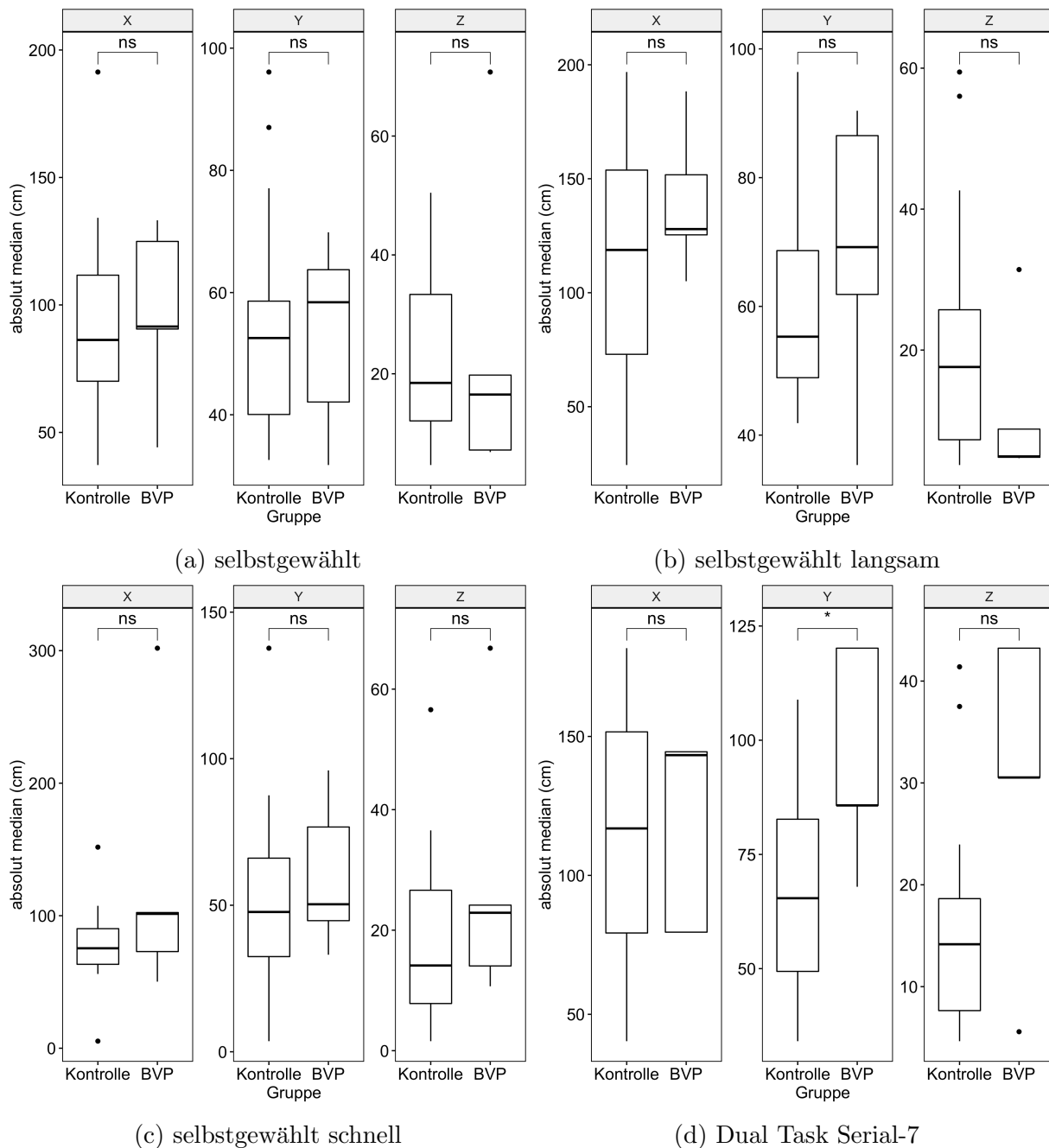


Abbildung 5.31: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie



Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	91.655	36.685	0.238	1	113.763	49.29	0.763
1	54.364	17.795	0.044	1	59.979	16.124	0.058
1	22.519	13.783	0.092	1	20.116	17.239	0.006
4	96.868	35.192	0.524	4	139.681	31.823	0.661
4	53.174	15.793	0.625	4	68.668	22.057	0.59
4	24.213	26.641	0.019	4	10.913	11.595	0.003

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	77.712	28.71	0.053	1	115.923	42.327	0.365
1	52.358	30.604	0.14	1	67.403	21.633	0.327
1	18.42	14.162	0.017	1	15.629	10.235	0.008
4	125.772	100.801	0.028	4	118.274	35.331	0.008
4	60.178	25.606	0.625	4	95.936	23.263	0.209
4	27.721	22.579	0.049	4	30.621	15.373	0.151

Tabelle 5.32: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Bei Betrachtung der Hauptgruppen zeigt sich ein signifikanter Unterschied für die Y-Achse ( $67.403 \pm 21.633[cm]$  vs.  $95.936 \pm 23.263[cm]$ ) beim Dual-Task.

## 5.5.2 Hauptgruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

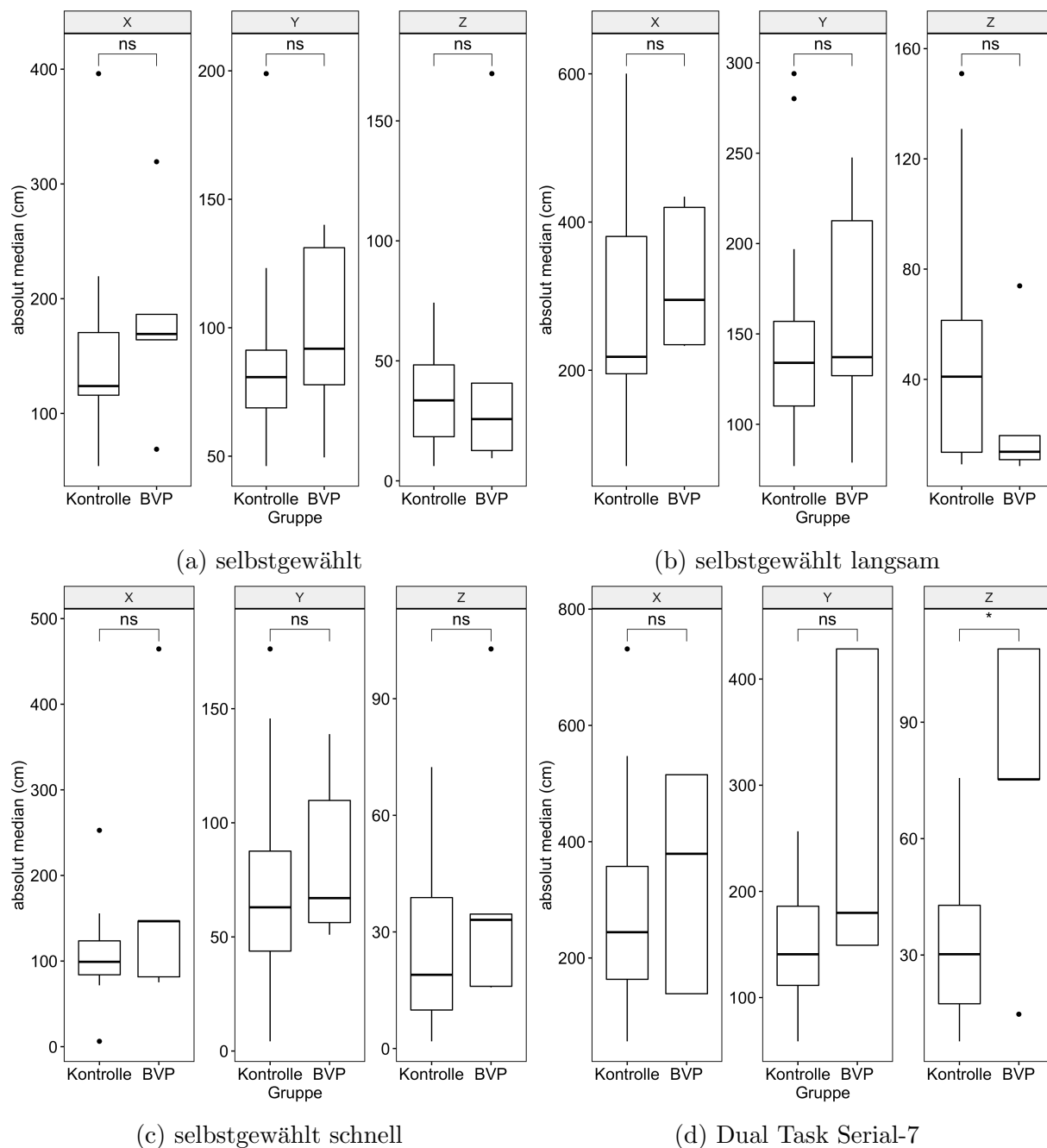


Abbildung 5.32: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	148.421	77.064	0.003	1	275.173	146.593	0.094
1	86.927	35.211	0.003	1	146.063	58.627	0.006
1	35.52	20.723	0.319	1	47.433	40.309	0.005
4	181.594	89.691	0.517	4	323.277	98.049	0.135
4	98.079	37.62	0.681	4	160.613	68.269	0.713
4	51.638	67.138	0.013	4	25.326	27.474	0.007

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	106.323	48.57	0.01	1	281.754	170.184	0.094
1	69.966	40.867	0.09	1	150.811	52.203	0.956
1	25.175	19.275	0.027	1	35.041	21.886	0.05
4	182.935	161.115	0.017	4	337.312	189.726	0.095
4	84.583	38.136	0.283	4	267.022	147.821	0.02
4	40.448	36.001	0.03	4	76.612	38.446	0.178

Tabelle 5.33: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Hauptgruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Dieses Bild zeigt sich auch bei zusätzlicher Geschwindigkeitskorrelation ( $150.811 \pm 52.203 [cm]$  vs.  $267.022 \pm 147.821 [cm]$ )

5.5.3 Untergruppenvergleich

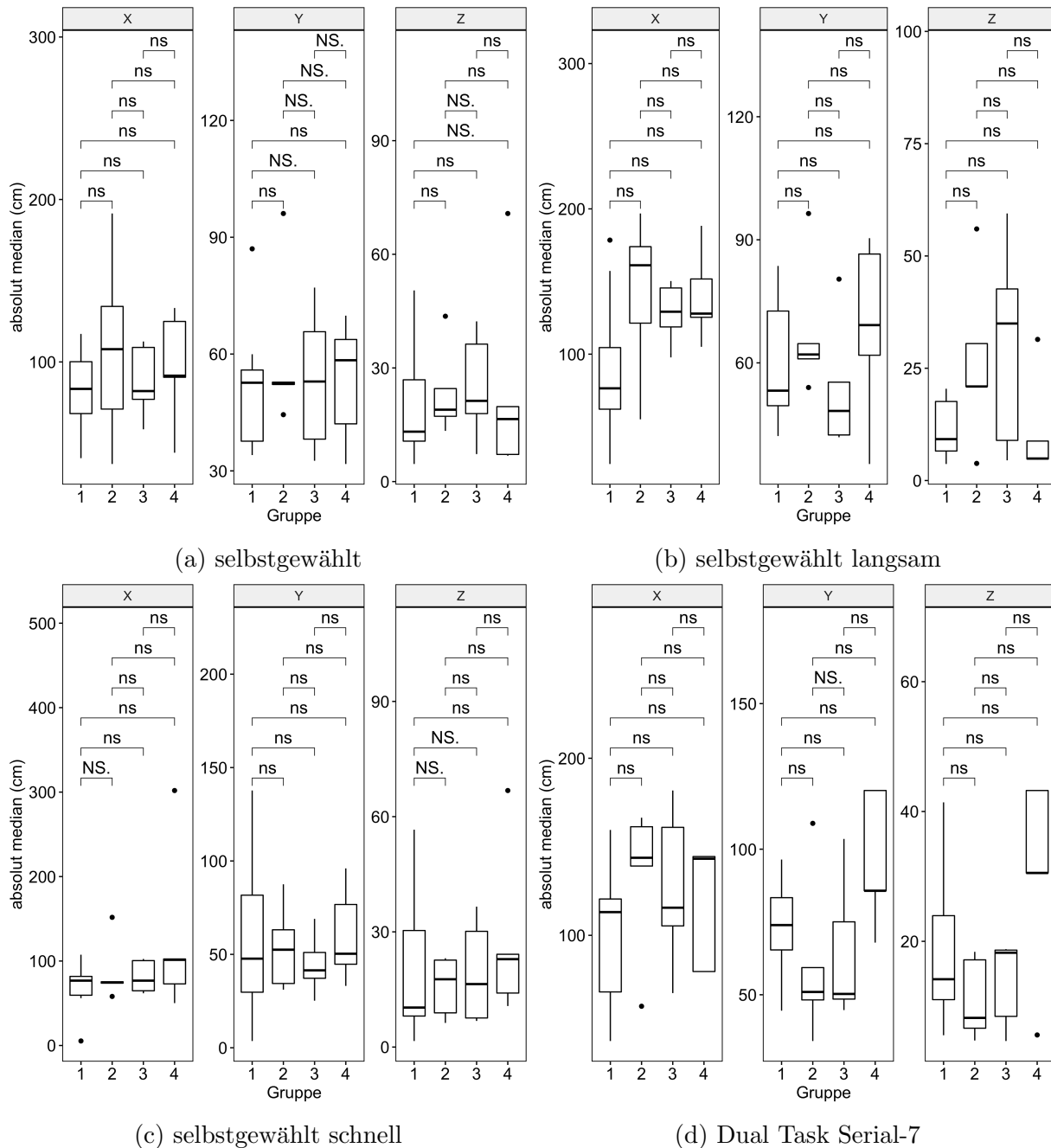


Abbildung 5.33: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	83.632	26.248	0.789	1	90.153	49.483	0.379
1	51.775	17.303	0.173	1	59.243	16.095	0.102
1	20.305	15.952	0.114	1	11.055	6.15	0.317
2	108.321	59.188	0.974	2	141.7	55.588	0.553
2	59.568	20.712	0.008	2	67.624	16.567	0.045
2	23.563	11.924	0.167	2	26.437	19.131	0.634
3	87.824	22.724	0.538	3	128.325	21.228	0.726
3	53.303	18.553	0.751	3	53.659	15.909	0.106
3	25.018	14.175	0.769	3	30.106	23.157	0.593
4	96.868	35.192	0.524	4	139.681	31.823	0.661
4	53.174	15.793	0.625	4	68.668	22.057	0.59
4	24.213	26.641	0.019	4	10.913	11.595	0.003

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	70.705	29.489	0.215	1	100.095	38.896	0.853
1	55.81	40.72	0.606	1	73.001	16.151	0.753
1	19.322	18.036	0.056	1	19.234	12.775	0.178
2	86.769	37.025	0.014	2	134.123	43.017	0.058
2	53.728	22.992	0.613	2	60.308	28.625	0.155
2	15.724	7.77	0.266	2	11.014	6.294	0.197
3	81.27	19.241	0.201	3	126.213	45.56	0.833
3	44.774	16.394	0.918	3	64.422	24.905	0.147
3	19.491	13.384	0.343	3	13.753	6.717	0.054
4	125.772	100.801	0.028	4	118.274	35.331	0.008
4	60.178	25.606	0.625	4	95.936	23.263	0.209
4	27.721	22.579	0.049	4	30.621	15.373	0.151

Tabelle 5.34: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Im Untergruppenvergleich zeigt sich kein signifikanter Unterschied.

## 5.5.4 Untergruppenvergleich geschwindigkeitskorreliert

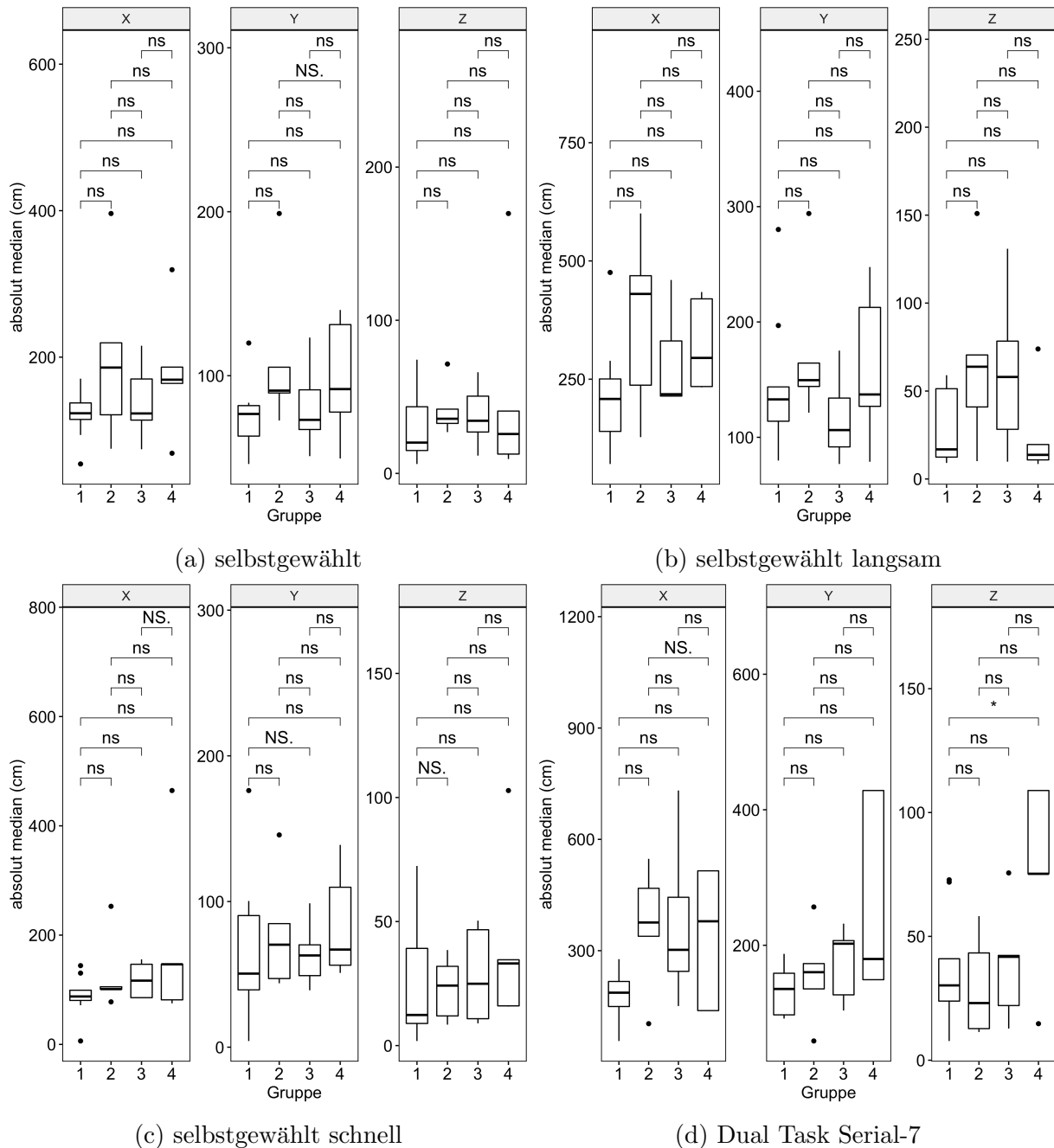


Abbildung 5.34: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie

Selbstgewählt				Selbstgewählt langsam			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	122.068	36.205	0.546	1	214.229	119.92	0.316
1	75.215	22.888	0.406	1	146.415	59.908	0.083
1	30.135	23.477	0.223	1	28.836	20.556	0.031
2	199.556	123.349	0.556	2	372.839	188.882	0.803
2	111.432	50.239	0.038	2	174.68	68.474	0.039
2	41.751	17.442	0.136	2	67.277	52.377	0.554
3	139.452	54.531	0.878	3	287.205	108.647	0.056
3	81.162	27.602	0.755	3	116.813	38.817	0.702
3	37.906	21.04	0.972	3	61.062	47.124	0.836
4	181.594	89.691	0.517	4	323.277	98.049	0.135
4	98.079	37.62	0.681	4	160.613	68.269	0.713
4	51.638	67.138	0.013	4	25.326	27.474	0.007

Selbstgewählt schnell				Dual Task Serial-7, selbstgewählt			
Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)	Gruppe	Mean	SD	Shapiro (p-Wert)
1	87.985	38.909	0.265	1	182.985	67.802	0.919
1	68.58	50.772	0.374	1	134.369	37.099	0.28
1	24.612	23.565	0.06	1	35.829	23.477	0.218
2	127.705	70.717	0.007	2	366.7	168.195	0.674
2	78.384	41.242	0.251	2	156.855	71.196	0.892
2	23.008	12.8	0.656	2	29.745	20.375	0.359
3	117.95	33.014	0.258	3	374.593	226.062	0.54
3	64.04	22.852	0.798	3	174.362	55.629	0.313
3	28.355	19.447	0.24	3	38.916	24.14	0.613
4	182.935	161.115	0.017	4	337.312	189.726	0.095
4	84.583	38.136	0.283	4	267.022	147.821	0.02
4	40.448	36.001	0.03	4	76.612	38.446	0.178

Tabelle 5.35: Absolut median der relativen Kopf-/Rumpfauslenkung im Untergruppenvergleich mit Geschwindigkeitskorrelation; Gruppen: (1) 20-40 Lebensjahr, (2) 40-60 Lebensjahr, (3) 60-80 Lebensjahr, (4) Bilaterale Vestibulopathie; Die Achsen sind in der Reihenfolge der Abbildungen eingetragen

Ebenfalls zeigt sich bei zusätzlicher Beachtung der Ganggeschwindigkeit kein signifikanter Unterschied

# Kapitel 6

## Diskussion

Zusammenfassung der Ergebnisse sowie nachfolgend deren Diskussion und Interpretation.

1. Ganggeschwindigkeit: Im Untergruppenvergleich zeigt sich tendenziell eine Abnahme der Ganggeschwindigkeit in den höheren Altersgruppen. Dies wird insbesondere beim schnellen Gehen deutlich. Die Gruppe der BVP Patienten liegt beim schnellen Gehen an der unteren Grenze.
2. Kopfpattie: Für die Beschleunigung ergeben sich im Untergruppenvergleich lediglich vereinzelt unspezifische sowie im Vergleich der Hauptgruppen keine Unterschiede. Die zusätzliche Geschwindigkeitskorrelation ändert dieses Bild nicht. Die Winkelgeschwindigkeit der Yaw-Achse zeigt sich im Vergleich der Hauptgruppen für BVP Probanden reduziert, wohingegen für diese Gruppe eine Tendenz für eine höhere Winkelgeschwindigkeit der Pitch-Achse besteht. Im Hauptgruppenvergleich des Bewegungsumfanges der Reids Plane fällt ein höherer Wert der Yaw-Achse der BVP Gruppe auf. Ebenso zeigt sich eine tendenzielle Zunahme für diese Gruppe beim Dual Task.
3. Rumpfbewegung: Lediglich für die Untergruppen finden sich vereinzelt unspezifische Differenzen der Beschleunigung. Die Winkelgeschwindigkeiten zeigen sich für die BVP Gruppe tendenziell reduziert.
4. Kopf-/Rumpfbewegung: Bei Betrachtung des Kopf-Rumpf-Bezugssystems zeigen sich weder für die Beschleunigung noch für die Winkelgeschwindigkeit signifikante Unterschiede.



## 6.1 Ganggeschwindigkeit

Die Analyse der Ganggeschwindigkeiten zeigt einerseits eine tendenzielle Abnahme insbesondere des maximal schnellen Gehens im Alter sowie eine tendenziell reduzierte Ganggeschwindigkeit mit geringerer Spannweite in der BVP Gruppe. Dies kann z.B. unter der postulierten Annahme eines Kompensationsmechanismus als Notwendigkeit gesehen werden, da dieser Mechanismus möglicherweise nicht die hohe Anpassungsfähigkeit an dynamische Geschwindigkeiten aufweist, welche mit normwertigen sensorischen Informationen erreicht werden können. Weiter könnte dies auch mit dem Mechanismus der Automation beim schnellen Gehen, wie es von (Dietrich et al., 2020) beschrieben wurde, zusammenhängen. Die fehlende Flexibilität des Systems sowie die schlechtere sensorische Information wird eventuell durch den Versuch, mehr Zeit zur Integration der Informationen zu gewähren, kompensiert.

## 6.2 Kopfpattie

Wie bereits bei Kavanagh et al. (2005b) bestätigt diese Arbeit, dass sich für Beschleunigungskräfte, die auf den Kopf wirken, keine signifikanten Unterschiede in den Altersgruppen zeigen. Dies konnte hier nun auch für die Gruppe der BVP Erkrankten gezeigt werden, sodass auch für diese Patientengruppe ein Kompensationsmechanismus (im Falle von Kavanagh et al. (2005b) über eine Änderung der Oberkörperkoordination) postuliert werden könnte. Die so erhaltene Rumpf-Kopf-Koordination trägt bei diesem sensorischen Ausfall möglicherweise der zentralen Rolle des stabilen Kopfes für die posturale Stabilität Rechnung (Vgl. 2.1.1). Zieht man zusätzlich die Geschwindigkeitskorrelation hinzu, zeigen sich wenige signifikante Unterschiede in den Altersgruppen. Hieraus lässt sich gegebenenfalls der Schluss ziehen, dass mögliche Unterschiede sich erst demaskieren, wenn definierte Parameter wie z.B. die Ganggeschwindigkeit von außen aktiv beeinflusst werden. In künftigen Untersuchungen sollten aus diesem Grund einzelne Parameter gezielt beeinflusst und untersucht werden. Ebenfalls sollten zusätzlich die Füße und die Hüfte mittels Marker erfasst werden, um mögliche Kompensationsmechanismen in diesem Bereich zu bestimmen.

Bei der Auswertung der Winkelgeschwindigkeit zeigt sich bei Betrachtung des Kopfsensors in den Hauptgruppen eine signifikante Reduktion in der Yaw-Achse für die BVP Gruppe beim selbst gewählten Gehen. Ebenso zeigt sich für die BVP Gruppe bei einigen Bedingungen eine tendenziell höhere Winkelgeschwindigkeit in der Pitch-Ebene. Betrachtete man die gleiche Auswertung unter dem Aspekt der Geschwindigkeitskorrelation, zeigen

sich Tendenzen, die den oben genannten ähneln, jedoch hier beim langsamen Gehen signifikant werden. Die Ganggeschwindigkeit scheint also möglicherweise eine Rolle zu spielen und könnte darauf hinweisen, dass durch die Änderung derselben z.B. mehr Sensorischeinformationen integriert werden können, wie in Dietrich et al. (2020) beschrieben. Mögliche Perturbationen, die hierbei in folgenden Studien weitere signifikante Unterschiede hervorbringen könnten, wären die Beeinflussung des Armschwunges wie in Cromwell et al. (2001b) beschrieben sowie die fixierte Ganggeschwindigkeit.

Eine Auswertung des Bewegungsumfanges des Kopfes mittels Reids-Plane zeigt beim direkten Untergruppenvergleich lediglich unspezifische signifikante Unterschiede, welche nicht eindeutig zugeordnet werden können. Im Hauptgruppenvergleich tritt ein erhöhter Wert der Yaw-Achse der BVP Gruppe beim selbst gewählten sowie schnellen Gehen hervor. Auffällig ist auch eine tendenzielle Zunahme des Bewegungsumfanges beim Dual Task Paradigma, welcher darauf hinweist, dass ein Kompensationsmechanismus kognitive Leistung beansprucht. Eine zusätzliche Geschwindigkeitskorrelation zeigt hier keine deutliche Änderung des Gesamtbildes.

## 6.3 Rumpfbewegung

Bezüglich möglicher Änderungen der Beschleunigungen des Rumpfes finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben. Kavanagh et al. (2005b) konnte demonstrieren, dass bei älteren Probanden ausgeprägtere Bewegungen des Oberkörpers zu einer Stabilisierung führen bei gleichzeitiger Abnahme der Flexibilität der Sprunggelenke. Hingegen spricht Cromwell et al. (2001a) von einer hohen Stabilität / Steifheit des Rumpfes mit hieraus möglicher resultierender Zunahme der Beschleunigungsamplitude.

Auch in dieser Arbeit zeigen sich bei der Beschleunigung des Rumpfes im Untergruppenvergleich lediglich in den Altersgruppen unspezifische signifikante Differenzen, welche sich auch bei Geschwindigkeitskorrelation bestätigen. Jedoch findet sich diese nicht im direkten Vergleich der beiden Hauptgruppen, auch wenn eine Geschwindigkeitskorrelation angewandt wird.

Bei Betrachtung der Rumpf-Winkelgeschwindigkeit zeigen sich die Werte für die BVP Gruppe tendenziell reduziert. Hier könnte diskutiert werden, ob Patienten mit einer BVP Erkrankung andere sensorische Information für einen Kompensationsmechanismus verwenden und hierdurch eine geringere Winkelgeschwindigkeit aufweisen.

## 6.4 Kopf-/Rumpfbewegung

Die Analyse des relativen Bewegungsunterschiedes von Kopf und Rumpf zeigt im Untergruppenvergleich auch mit Geschwindigkeitskorrelation keinen signifikanten Unterschied. Dies bestätigt sich auch im Hauptgruppenvergleich.

Betrachtet man die Unterschiede der Winkelgeschwindigkeiten von Kopf und Rumpf, so findet sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied, auch bei Berücksichtigung der Ganggeschwindigkeit. Tendenziell scheint die BVP-Gruppe einen geringeren Wert für die Yaw- und Pitch-Achse zu haben.

In Zusammenschau dieser Parameter lässt sich hier ein entsprechender Kompensationsmechanismus vermuten, welcher die Kopf-/Rumpfabstimmung auch bei BVP Patienten effektiv ausgleicht und somit ähnliche Ergebnisse wie Cromwell et al. (2001b) bei gesunden Altersgruppen erzielt.

## 6.5 Kognitiver Dual Task und Feedback Model

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert und durch Melzer et al. (2001) beschrieben, kommt es mit zunehmendem Alter zu einer Stabilisierung des Drehpunktes der Sprunggelenke bei kognitiven Dual Task Aufgaben. Da die Dämpfung innerhalb des dynamischen Systems zu geringeren Kapazitäten führt, wäre folglich zu erwarten, dass Ausgleichsbewegungen, welche weiter oben stattfinden, stärker ausgeprägt sind. Dies könnte sich zum Beispiel in höheren Beschleunigungen bezüglich der Dynamik sowie größeren Bewegungsumfängen auswirken könnte. Beim Betrachten der IMU-Sensoren des Kopf- sowie Rumpfes zeigten sich jedoch in der Einzelauswertung sowie auch in der Auswertung der relativen Werte zueinander keine eindeutigen Unterschiede. Eine andere Erklärung wäre, dass die fehlende Kompensation der Sprunggelenke bereits über die Bewegung der Hüfte ausgeglichen wird und somit die Hüft-Strategie, wie sie bereits durch Horak und Nashner (1986) beschrieben, ausreicht, um eine ausreichende Kompensation zu erreichen.

## 6.6 Methodenkritik

Da für diese experimentelle Arbeit lediglich einzelne Studien vorlagen, die Teilaspekte der Ergebnisse diskutieren, war nicht abzusehen, mit welchen Effekten und Effektstärken zu rechnen ist. Im Gesamten kann diese Arbeit als Vorarbeit zu weiteren Studien gewer-

tet werden. Aus diesem Grund wurden auch die umfangreichen Parametermodalitäten des Kopfes und Rumpfes erfasst und auch einzeln analysiert, um einen möglichst differenzierten Eindruck über Unterschiede zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen insgesamt vorwiegend Tendenzen für Abgrenzungen der einzelnen Gruppen bzw. Modalitäten / Achsen, welche sich möglicherweise bei einer größeren Power der Gruppen als signifikant herausstellen könnten. Eine Schwäche, die sich im Verlauf der Messungen sowie auch der Auswertung zeigte, ist der Versuchsaufbau mit einer Gangstrecke, die nicht geradlinig ist. Dies war aber aufgrund der räumlichen Gegebenheiten und der Einschränkung der Kamerawinkel nicht anders zu lösen. Hier sollte bei weiteren Messungen eine einfachere, geradlinige Gangstrecke gewählt werden. Weiter zeigte sich wie oben ausgeführt eine Abhängigkeit der einzelnen Parameter von der Ganggeschwindigkeit, sodass auch bei weiteren Messungen die Überlegung einer aktiven Geschwindigkeitskontrolle (z.B. Laufband) sowie möglichen Perturbationen in verschiedenen Gangphasen diskutiert werden sollte. Zusätzlich ergab sich durch die jeweils durchgeführte Untergruppenanalyse der Hinweis, dass bereits das Alter Einfluss auf die erhobenen Parameter hat und somit Vergleiche mit BVP Probanden auch in einer entsprechenden Alterskohorte mit ausreichender Power geführt werden sollte. Zuletzt sollte in einer weiteren Studie auch erfasst werden, in wieweit der Beginn oder die bereits vergangene Zeit der Erkrankung bei Kompensationsmechanismen, welche sich möglicherweise auch erst mit der Zeit ausbilden bzw. verbessern, eine Rolle spielen. Hierzu könnten neuerkrankte BVP Patienten (klinisch z.B. erkennbar an noch fehlender zentraler Kompensation) und Erkrankte mit eingesetzter Kompensation eingeschlossen und differenziert werden.

## 6.7 Fazit

Die vorliegende Arbeit konnte zeigen, dass BVP Patienten in der Zusammenschau der gemessenen Parameter Kompensationsmechanismen entwickeln, um ihr sensorisches Defizit auszugleichen. Lediglich in wenigen Modalitäten lassen sich signifikante Unterschiede herausstellen.

Da diese Arbeit auch das Ziel verfolgte, Methoden zur Messung der Kopf-Rumpf-Stabilität zu etablieren und hier auch ein Novum darstellt, zeigten sich wie zu erwarten methodische Optimierungsmöglichkeiten. Diese konnten identifiziert und dedizierte Vorschläge zu Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Das Verständnis für Kompensationsmechanismen, deren Trainierbarkeit bzw. Abschätzung der Entwicklung und somit Risikostratifizierung für z.B. Stürze sowie deren Folgen ist von

hohem Interesse für die Lebensqualität der Patienten und auch von gesundheitsökonomischer Bedeutung. Zudem lassen die Untersuchungen an dieser paradigmatischen Patientengruppe möglicherweise in Zukunft Rückschlüsse auf andere neurologische Erkrankungen mit vestibulär-sensorischen Defiziten zu. Die vorgestellte Methode könnte dann weitere Kompensationsmechanismen identifizieren, welche wiederum in spezifischen therapeutischen Trainings adressiert werden könnten.

# Kapitel 7

## Literaturverzeichnis

- Allum, J. H. J. (1983). Organization of stabilizing reflex responses in tibialis anterior muscles following ankle flexion perturbations of standing man. *Brain Research*, 264(2):297–301.
- Berthoz, A., Lacour, M., Soechting, J. F., und Vidal, P. P. (1979). No Title. 50(C):197–209.
- Blanks, R. H., Curthoys, I. S., und Markham, C. H. (1975). Planar relationships of the semicircular canals in man. *Acta Otolaryngol*, 80(3-4):185–196.
- Bloem, B. R., Beckley, D. J., Remler, M. P., Roos, R. A., und van Dijk, J. G. (1995). Postural reflexes in Parkinson’s disease during ‘resist’ and ‘yield’ tasks. *J Neurol Sci*, 129(2):109–119.
- Bolton, D. A. (2015). The role of the cerebral cortex in postural responses to externally induced perturbations.
- Bronstein, A. M. (1986). Suppression of visually evoked postural responses. *Experimental brain research*, 63(3):655–8.
- Cappozzo, A. (1981). Analysis of the linear displacement of the head and trunk during walking at different speeds. *Journal of Biomechanics*, 14(6):411–425.
- Chiari, L., Cappello, A., Lenzi, D., und Della Croce, U. (2000). An improved technique for the extraction of stochastic parameters from stabilograms. *Gait Posture*, 12(3):225–234.
- Cole, M. H., Silburn, P. A., Wood, J. M., Worringham, C. J., und Kerr, G. K. (2010). Falls in Parkinson’s disease: kinematic evidence for impaired head and trunk control. *Mov Disord*, 25(14):2369–2378.
- Collins, J. J. und De Luca, C. J. (1993). Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Exp Brain Res*, 95(2):308–

- 318.
- Crane, B. T. und Demer, J. L. (2000). Effects of vestibular and cerebellar deficits on gaze and torso stability during ambulation. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 123(1 Pt 1):22–29.
- Cromwell, R. L., Aadland-Monahan, T. K., Nelson, A. T., Stern-Sylvestre, S. M., und Seder, B. (2001a). Sagittal plane analysis of head, neck, and trunk kinematics and electromyographic activity during locomotion. *J Orthop Sports Phys Ther*, 31(5):255–262.
- Cromwell, R. L., Newton, R. A., und Carlton, L. G. (2001b). Horizontal plane head stabilization during locomotor tasks. *J Mot Behav*, 33(1):49–58.
- Cromwell, R. L., Newton, R. A., und Forrest, G. (2002). Influence of vision on head stabilization strategies in older adults during walking. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 57(7):M442–8.
- Day, B. L., Séverac Cauquil, A., Bartolomei, L., Pastor, M. A., und Lyon, I. N. (1997). Human body-segment tilts induced by galvanic stimulation: A vestibularly driven balance protection mechanism. *Journal of Physiology*, 500(3):661–672.
- Dichgans, J. und Brandt, T. (1978). Effects on self-motion perception and postural control. In *Handbook of sensory physiology Vol. VIII: Perception*, Seiten 805–845.
- Diener, H. C. und Dichgans, J. (1988). On the role of vestibular, visual and somatosensory information for dynamic postural control in humans. *Progress in Brain Research*, 76(C):253–262.
- Dieterich, M. und Brandt, T. (2015). The bilateral central vestibular system: its pathways, functions, and disorders. *Ann N Y Acad Sci*, 1343:10–26.
- Dietrich, H., Heidger, F., Schniepp, R., MacNeilage, P. R., Glasauer, S., und Wuehr, M. (2020). Head motion predictability explains activity-dependent suppression of vestibular balance control. *Scientific Reports*, 10(1):1–10.
- Dietz, V., Mauritz, K. H., und Dichgans, J. (1980). Body oscillations in balancing due to segmental stretch reflex activity. *Exp Brain Res*, 40(1):89–95.
- Dijkstra, T. M., Schöner, G., und Gielen, C. C. (1994). Temporal stability of the action-perception cycle for postural control in a moving visual environment. *Experimental Brain Research*, 97(3):477–486.
- Fitzpatrick, R. und McCloskey, D. I. (1994). Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *The Journal of Physiology*, 478(1):173–186.

- 
- Florence, C. S., Bergen, G., Atherly, A., Burns, E., Stevens, J., und Drake, C. (2018). Medical Costs of Fatal and Nonfatal Falls in Older Adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 66(4):693–698.
- Green, A. M. und Angelaki, D. E. (2010). Internal models and neural computation in the vestibular system. *Exp Brain Res*, 200(3-4):197–222.
- Hauer, K., Pfisterer, M., Weber, C., Wezler, N., Kliegel, M., und Oster, P. (2003). Cognitive impairment decreases postural control during dual tasks in geriatric patients with a history of severe falls. *J Am Geriatr Soc*, 51(11):1638–1644.
- Hlavacka, F. und Njiokiktjien, C. (1985). Postural responses evoked by sinusoidal galvanic stimulation of the labyrinth: Influence of head position. *Acta Oto-Laryngologica*, 99(1-2):107–112.
- Holt, K. G., Ratcliffe, R., und Jeng, S. F. (1999). Head stability in walking in children with cerebral palsy and in children and adults without neurological impairment. *Physical therapy*, 79(12):1153–62.
- Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age Ageing*, 35 Suppl 2:ii7–ii11.
- Horak, F. B. und Diener, H. C. (1994). Cerebellar control of postural scaling and central set in stance. *J Neurophysiol*, 72(2):479–493.
- Horak, F. B., Diener, H. C., und Nashner, L. M. (1989). Influence of central set on human postural responses. *J Neurophysiol*, 62(4):841–853.
- Horak, F. B. und Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *J Neurophysiol*, 55(6):1369–1381.
- Jacobs, J. V. und Horak, F. B. (2007). Cortical control of postural responses. *J Neural Transm (Vienna)*, 114(10):1339–1348.
- Jeka, J. J., Schöner, G., Dijkstra, T., Ribeiro, P., und Lackner, J. R. (1997). Coupling of fingertip somatosensory information to head and body sway. *Experimental Brain Research*, 113(3):475–483.
- Johansson, R. und Magnusson, M. (1991). Human postural dynamics.
- Kavanagh, J., Barrett, R., und Morrison, S. (2006). The role of the neck and trunk in facilitating head stability during walking. *Exp Brain Res*, 172(4):454–463.
- Kavanagh, J. J., Barrett, R. S., und Morrison, S. (2005a). Age-related differences in head and trunk coordination during walking. *Hum Mov Sci*, 24(4):574–587.
- Kavanagh, J. J., Morrison, S., und Barrett, R. S. (2005b). Coordination of head and trunk



- accelerations during walking. *Eur J Appl Physiol*, 94(4):468–475.
- Kavounoudias, A., Gilhodes, J. C., Roll, R., und Roll, J. P. (1999). From balance regulation to body orientation: Two goals for muscle proprioceptive information processing? *Experimental Brain Research*, 124(1):80–88.
- Lee, D. N. und Lishman, J. R. (1975). Visual proprioceptive control of stance. *Journal of human movement studies*.
- Manzoni, D. (2007). The cerebellum and sensorimotor coupling: looking at the problem from the perspective of vestibular reflexes. *Cerebellum*, 6(1):24–37.
- Massion, J. (1992). Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Prog Neurobiol*, 38(1):35–56.
- Maurer, C., Mergner, T., und Peterka, R. J. (2006). Multisensory control of human upright stance. *Experimental Brain Research*, 171(2):231–250.
- Melzer, I., Benjuya, N., und Kaplanski, J. (2001). Age-related changes of postural control: Effect of cognitive tasks. *Gerontology*, 47(4):189–194.
- Menz, H. B., Lord, S. R., und Fitzpatrick, R. C. (2003). Age-related differences in walking stability. *Age and Ageing*, 32(2):137–142.
- Mergner, T., Maurer, C., und Peterka, R. J. (2002). Sensory contributions to the control of stance: a posture control model. *Adv Exp Med Biol*, 508:147–152.
- Mergner, T., Maurer, C., und Peterka, R. J. (2003). A multisensory posture control model of human upright stance. *Prog Brain Res*, 142:189–201.
- Mergner, T. und Peterka, R. J. (2016). Human Sense of Balance. In Goswami, A. und Vadakkepat, P., Herausgeber, *Humanoid Robotics: A Reference*, Seiten 1–38. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Nashner, L. M. und Wolfson, P. (1974). Influence of head position and proprioceptive cues on short latency postural reflexes evoked by galvanic stimulation of the human labyrinth. *Brain Research*, 67(2):255–268.
- Peterka, R. J. (2002). Sensorimotor integration in human postural control. *J Neurophysiol*, 88(3):1097–1118.
- Peterka, R. J. und Loughlin, P. J. (2004). Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control. *J Neurophysiol*, 91(1):410–423.
- Peterka, R. J., Statler, K. D., Wrisley, D. M., und Horak, F. B. (2011). Postural compensation for unilateral vestibular loss. *Frontiers in Neurology*, SEP.
- Pettorossi, V. E. und Schieppati, M. (2014). Neck proprioception shapes body orientation and perception of motion. *Front Hum Neurosci*, 8:895.

- 
- Pfeiffer, C., Serino, A., und Blanke, O. (2014). The vestibular system: a spatial reference for bodily self-consciousness. *Front Integr Neurosci*, 8:31.
- Pozzo, T., Berthoz, A., und Lefort, L. (1990). Head stabilization during various locomotor tasks in humans. I. Normal subjects. *Experimental Brain Research*, 82:97–106.
- Proske, U. und Gandevia, S. C. (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol Rev*, 92(4):1651–1697.
- Rabbitt, R. D., Damiano, E. R., und Grant, J. W. (2004). Biomechanics of the semicircular canals and otolith organs. In *The vestibular system*, Seiten 153–201. Springer.
- Ratcliffe, R. J. und Holt, K. G. (1997). Low frequency shock absorption in human walking. *Gait and Posture*, 5(2):93–100.
- Roll, J. P., Vedel, J. P., und Ribot, E. (1989). Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res*, 76(1):213–222.
- Schieppati, M. und Nardone, A. (1991). Free and supported stance in Parkinson’s disease. The effect of posture and ‘postural set’ on leg muscle responses to perturbation, and its relation to the severity of the disease. *Brain*, 114 ( Pt 3:1227–1244.
- Schmid, M., Casabianca, L., Bottaro, A., und Schieppati, M. (2008). Graded changes in balancing behavior as a function of visual acuity. *Neuroscience*, 153(4):1079–1091.
- Schmid, M., Conforto, S., Lopez, L., und D’Alessio, T. (2007). Cognitive load affects postural control in children. *Experimental Brain Research*, 179(3):375–385.
- Schneider, E., Glasauer, S., und Dieterich, M. (2002). Comparison of human ocular torsion patterns during natural and galvanic vestibular stimulation. *J Neurophysiol*, 87(4):2064–2073.
- Schniepp, R., Wuehr, M., Neuhaeusser, M., Kamenova, M., Dimitriadis, K., Klopstock, T., Strupp, M., Brandt, T., und Jahn, K. (2012). Locomotion speed determines gait variability in cerebellar ataxia and vestibular failure. *Movement Disorders*, 27(1):125–131.
- Sieńko-Awierianów, E., Lubkowska, A., Kolano, P., und Chudecka, M. (2018). Postural stability and risk of falls per decade of adult life - A pilot study. *Anthropological Review*, 81(1):102–109.
- St George, R. J. und Fitzpatrick, R. C. (2011). The sense of self-motion, orientation and balance explored by vestibular stimulation. *J Physiol*, 589(Pt 4):807–813.
- Straube, A., Paulus, W., und Brandt, T. (1990). Influence of visual blur on object-motion

- detection, self-motion detection and postural balance. *Behavioural Brain Research*, 40(1):1–6.
- Strupp, M., Arbusow, V., Pereira, C. B., Dieterich, M., und Brandt, T. (1999). Subjective straight-ahead during neck muscle vibration: Effects of ageing. *NeuroReport*, 10(15):3191–3194.
- Teasdale, N. und Simoneau, M. (2001). Attentional demands for postural control: the effects of aging and sensory reintegration. *Gait Posture*, 14(3):203–210.
- Treleaven, J. (2008). Sensorimotor disturbances in neck disorders affecting postural stability, head and eye movement control. *Man Ther*, 13(1):2–11.
- van der Kooij, H. und de Vlugt, E. (2007). Postural responses evoked by platform perturbations are dominated by continuous feedback. *J Neurophysiol*, 98(2):730–743.
- Wei, S. H., Chen, P. Y., Chen, H. J., Kao, C. L., und Schubert, M. C. (2016). Visual afference mediates head and trunk stability in vestibular hypofunction. *J Clin Neurosci*, 29:139–144.
- Winter, D. A., Prince, F., Frank, J. S., Powell, C., und Zabjek, K. F. (1996). Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *J Neurophysiol*, 75(6):2334–2343.

# Kapitel 8

## Anhang

### 8.1 Raspberry Pi C++ Quellcode

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <errno.h>
#include <stdlib.h>
#include <wiringPi.h>

#define BUTTON_PIN_IN 0
#define BUTTON_PIN_OUT 1

int wait_btn();
int ledon();

int ledon() {
    return 0;
}

int wait_btn() {
    if (digitalRead(BUTTON_PIN_IN) == 0) {
        while (digitalRead(BUTTON_PIN_IN) == 0) {
        }
        digitalWrite(BUTTON_PIN_OUT, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(BUTTON_PIN_OUT, LOW);
        printf("ON"); fflush(stdout);
        while (digitalRead(BUTTON_PIN_IN) == 0) {
        }
        ledon();
        delay(1000);
    }
    return 0;
}

int main(void) {
    wiringPiSetup();
    pinMode(BUTTON_PIN_IN, INPUT);
    pinMode(BUTTON_PIN_OUT, OUTPUT);
    while (1) {
        wait_btn();
    }
}
```

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen, die mich bei der Anfertigung der Doktorarbeit unterstützt haben, meinen großen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Klaus Jahn, PD Dr. med. Roman Schniepp und Herrn Dr. Max Wühr für die ausgezeichnete Betreuung bei der Durchführung der gesamten Arbeit.

Ein weiterer besonderer Dank gilt meiner Mutter Bertel Decker sowie Sandra Rothkirch und Freunden, denen ich für ihre Unterstützung, Geduld und Ermutigungen während des der Arbeit an dieser Doktorarbeit danke.



## Eidesstattliche Versicherung

Decker, Julian

\_\_\_\_\_  
Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

### **Kopf-Rumpf Koordination bei Gesunden im Altersverlauf und bei Patienten mit bilateraler Vestibulopathie**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Neubiberg, 12.11.2023

Ort, Datum

Julian Decker

Unterschrift Julian Decker