

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>12</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>13</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>15</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>20</b>
1.1 <b>Problemstellung</b> .....	<b>22</b>
1.2 <b>Begriffsbestimmungen</b> .....	<b>23</b>
<b>2 Forschungsstand</b> .....	<b>27</b>
2.1 <b>Periphere Aspekte der Sensomotorik nach Verletzungen des vorderen Kreuzbandes</b> .....	<b>27</b>
2.1.1 <b>Der periphere Ausgangspunkt: beteiligte Strukturen und methodische Zugänge</b> .....	<b>28</b>
2.1.2 <b>Winkelreproduktionen</b> .....	<b>33</b>
2.1.3 <b>Kraftreproduktionen</b> .....	<b>38</b>
2.1.4 <b>Neuromuskuläre Veränderungen nach Verletzungen des vorderen Kreuzbandes</b> .....	<b>41</b>
2.2 <b>Zentrale Aspekte der Sensomotorik nach ACL Verletzung</b> .....	<b>44</b>
2.2.1 <b>Das Fenster zum Zentralnervensystem: Beteiligte Strukturen und methodische Zugänge</b> .....	<b>44</b>
2.2.2 <b>EEG und sensomotorische Aufgaben</b> .....	<b>51</b>
2.2.3 <b>Zentrale Auswirkungen einer Kreuzbandverletzung</b> .....	<b>55</b>
2.2.4 <b>Mentale Bewegungsvorstellung im zentralen Abbild</b> .....	<b>57</b>
<b>3 Hinführung zum Untersuchungsansatz</b> .....	<b>60</b>
<b>4 Ziel- und Fragestellungen</b> .....	<b>62</b>
4.1 <b>Fragestellungen Experiment I: Winkelreproduktion</b> .....	<b>62</b>

4.2	Fragestellungen Experiment II: Kraftreproduktion .....	64
5	<b>Methodik</b> .....	<b>67</b>
5.1	<b>Personenstichprobe</b> .....	<b>67</b>
5.2	<b>Untersuchungsgang</b> .....	<b>69</b>
5.2.1	Voruntersuchung.....	69
5.2.2	Experiment I: Winkelreproduktion .....	70
5.2.3	Experiment II: Kraftreproduktion .....	72
5.3	<b>Messplatz und Parametererhebung</b> .....	<b>73</b>
5.3.1	Aufbau des Messplatzes .....	74
5.3.2	Subjektive Beurteilung der Kniefunktionalität – Kniescores.....	77
5.3.3	Psychometrische Parameter .....	77
5.3.4	Biomechanische Parameter .....	80
5.3.5	Neuromuskuläre Parameter .....	81
5.3.6	Zentrale Parameter und deren Erfassung mittels EEG .....	83
5.4	<b>Statistik</b> .....	<b>84</b>
6	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>86</b>
6.1	<b>Voraussetzungen</b> .....	<b>86</b>
6.2	<b>Experiment 1: Winkelreproduktion</b> .....	<b>88</b>
6.2.1	Anthropometrische und psychometrische Daten .....	88
6.2.2	Einfluss der Verletzung auf die Winkelreproduktionen .....	89
6.2.3	Einfluss der Verletzung auf die mentale Vorstellung .....	111
6.3	<b>Experiment 2: Kraftreproduktion</b> .....	<b>115</b>
6.3.1	Anthropometrische und psychometrische Daten .....	115
6.3.2	Einfluss der Verletzung auf die Kraftreproduktionen.....	116
6.3.3	Einfluss der Verletzung auf die mentale Vorstellung .....	133
7	<b>Diskussion</b> .....	<b>136</b>
7.1	<b>Experiment I: die Winkelreproduktionen</b> .....	<b>137</b>
7.1.1	Einfluss der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes auf periphere und zentrale Parameter während der Winkelreproduktion .....	138
7.1.2	Einfluss von Übung im Zeitverlauf auf die peripheren und zentralen Parameter während der Winkelreproduktionen .....	150
7.1.3	Einfluss der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes auf die mentale Vorstellung der Winkelreproduktion.....	154
7.2	<b>Experiment II: die Kraftreproduktionen</b> .....	<b>156</b>

7.2.1	Einfluss der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes auf periphere und zentrale Parameter während der Winkelreproduktion .....	157
7.2.2	Einfluss von Übung auf die peripheren und zentralen Parameter während der Kraftreproduktionen .....	161
7.2.3	Einfluss der Rekonstruktion auf die mentale Vorstellung der Kraftreproduktionen .....	163
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen – das große Ganze .....</b>	<b>165</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>170</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>172</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>I</b>
11.1	Fragebögen .....	II
11.2	Probandeninformationen .....	VIII
11.3	Deskription .....	IX
11.4	Ergebnisse Prüfstatistik .....	XVI
	<b>Publikationen .....</b>	<b>XXI</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>XXIII</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Überblick des Sensomotorischen Systems (mod. nach Biedert et al. 1998) .....	24
Abb. 2: Einteilung der Hirnareale nach Brodmann (Brodmann 1985) .....	46
Abb. 3: Studiendesign Experiment I: Winkelreproduktion.....	71
Abb. 4: Studiendesign Experiment II: Kraftreproduktion .....	73
Abb. 5: Umgebauter Messplatz Schnell M3.....	74
Abb. 6: Übertragung der Drehung der Geräteachse auf das Potentiometer .....	75
Abb. 7: Versuchsaufbau der beiden Experimente Winkel- und Kraftreproduktion .....	76
Abb. 8: Visuelle Analogskala (VAS) zum subjektiven Stressempfinden mit „0“=kein Stress und „10“=höchster Stress .....	78
Abb. 9: Beispielhafte Darstellung der erhobenen Rohdaten einer Winkelreproduktion. Hervorgehoben ist die Zeitspanne von 1000 ms beginnend mit dem Anfang der Plateauphase, die zur Ermittlung der IEMG´s von RF, VM und VL dient. ....	82
Abb. 10: Standardisiertes, internationales 10:20 System zur Elektrodenpositionierung .....	83
Abb. 11: Psychometrische Daten der durchgeführten Tests VAS, HAKEMP 90 und STAI während des Experimentes Winkelreproduktion in den Gruppen control und ACL.....	89
Abb. 12: Ergebnisse der sensomotorischen Leistungen in den Untersuchungsgruppen zu den Messzeitpunkten M1 – M8 dargestellt anhand der Mittelwerte und Standardabweichungen des Reproduktionsfehlers [Abweichung vom Zielwinkel in °] [*/+ p<.05, **/++ p<.01, ***/+++ p<.001].....	90
Abb.13: Latenzen [ms] von der ersten Muskelaktivität bis zum Erreichen der Plateauphase (der Haltephase des Zielwinkels) [*p<.05, **p<.01, ***p<.001].....	91
Abb. 14: Anteilige Beteiligungen [%] der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität [100%] während der Winkelreproduktionen zu den Messzeitpunkten M1 bis M8 in der Kontroll- und ACL-Gruppe.....	93
Abb. 15: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Theta Frequenzband zu Beginn der Winkelreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	95
Abb. 16: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu\text{V}^2$ ] während der Winkelreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität)	96
Abb. 17: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu\text{V}^2$ ] im Theta-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der fronto-zentralen Elektrodenposition (Fz).....	98
Abb. 18: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu\text{V}^2$ ] im Theta-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der links-frontalen Elektrodenposition (F3) .....	98
Abb. 19: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu\text{V}^2$ ] im Theta-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8	

(gesund/verletzt) an der rechts-frontalen Elektrodenposition (F4).....	99
Abb. 20: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Theta-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der rechts-frontalen Elektrodenposition (F4).....	99
Abb. 21: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Alpha-1 Frequenzband zu Beginn der Winkelreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	101
Abb. 22: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der Winkelreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität)	102
Abb. 23: Globale, über alle 17 Elektrodenpositionen gemittelte, spektrale Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-1 Frequenzband. Dargestellt sind jeweils MW $\pm$ SD in der Kontroll- und ACL-Gruppe an den jeweiligen Messzeitpunkten .....	103
Abb. 24: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Alpha-2 Frequenzband zu Beginn der Winkelreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	104
Abb. 25: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der Winkelreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität)	105
Abb. 26: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-2 Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der fronto-parietalen Elektrodenposition (Pz) .....	106
Abb. 27: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-2 Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der links-parietalen Elektrodenposition (P3) .....	107
Abb. 28: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-2 Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der rechts-parietalen Elektrodenposition (P4).....	107
Abb. 29: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-2 Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an den temporalen Elektrodenposition (T3, T4, T5, T6) .....	108
Abb. 30: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Beta-1 Frequenzband zu Beginn der Winkelreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	109
Abb. 31: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der Winkelreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität)	110
Abb. 32: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb	

bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Theta, Alpha-1, Alpha-2 und Beta-1 Frequenzband während der mentalen Vorstellung der Winkelreproduktion .....	112
Abb. 33: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der mentalen Vorstellung der Winkelreproduktionen (M9) und der anschließenden Ruhephase (M10) an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe .....	113
Abb. 34: Psychometrische Daten der durchgeführten Tests STAI (A) und VAS (B) während des Experimentes Kraftreproduktion in den Gruppen control und ACL.....	116
Abb. 35: Ergebnisse der sensomotorischen Leistungen in den Untersuchungsgruppen zu den Messzeitpunkten M1 – M8 dargestellt anhand der Mittelwerte und Standardabweichungen des Reproduktionsfehlers [Abweichung vom Zielwinkel in °]....	117
Abb. 36: Anteilige Beteiligungen [%] der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität [100%] während der Kraftreproduktionen zu den Messzeitpunkten M1 bis M8 in der Kontroll- und ACL-Gruppe.....	119
Abb. 37: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Theta Frequenzband zu Beginn der Kraftreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	120
Abb. 38 : Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der Kraftreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität) [*p<.05, ** p<.01, ***p<.001] .....	121
Abb. 39: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Theta-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der rechts-frontalen Elektrodenposition (Fz).....	122
Abb. 40: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Theta-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der rechts-frontalen Elektrodenposition (F3).....	123
Abb. 41: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Theta-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der rechts-frontalen Elektrodenposition (F4).....	123
Abb. 42: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Alpha-1 Frequenzband zu Beginn der Kraftreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	124
Abb. 43: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der Kraftreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität)	125
Abb. 44: Globale, über alle 17 Elektrodenpositionen gemittelte, spektrale Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-1 Frequenzband. Dargestellt sind jeweils MW $\pm$ SD in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den jeweiligen Messzeitpunkten .....	126

Abb. 45: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Alpha-2 Frequenzband zu Beginn der Kraftreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	127
Abb. 46: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der Kraftreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität)	128
Abb. 47: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-2-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der parieto-zentralen Elektrodenposition (Pz).....	129
Abb. 48: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-2-Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an der rechts-parietalen Elektrodenposition (P3).....	129
Abb. 49: Entwicklung der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] im Alpha-2 Frequenzbereich der beiden Gruppen control und ACL von M1-M4 (gesund/unverletzt) und M5-M8 (gesund/verletzt) an den temporalen Elektrodenposition (T3, T4, T5, T6) .....	130
Abb. 50: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Beta-1 Frequenzband zu Beginn der Kraftreproduktion mit der jeweiligen Extremität (M1: erste/unverletzte; M5: zweite/verletzte) .....	131
Abb. 51: Übersicht der spektralen Leistungen [ $\mu V^2$ ] während der Kraftreproduktionen an den 17 gemessenen Elektrodenpositionen in der Kontroll- und ACL-Gruppe zu den Messzeitpunkten M1 (erste/unverletzte Extremität) und M5 (zweite/verletzte Extremität)	132
Abb. 52: Quantitative topographische Hirnkarte (Aufsicht) der Veränderung innerhalb bzw. der Unterschiede zwischen den Gruppen in den spektralen Leistungsdichten im Theta, Alpha-1, Alpha-2 und Beta-1 Frequenzband während der mentalen Vorstellung der Winkelreproduktion .....	134

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anthropometrische Daten der ACL- und Kontrollgruppe .....	67
Tab. 2: Detaillierte Darstellung der ACL-Gruppe.....	68
Tab. 3: Einteilung der Frequenzbänder nach spektraler Frequenzanalyse .....	84
Tab. 4: Neuromuskuläre Aktivität (iEMG [V]) in MW ± SD der an der Extension.....	92
Tab. 5: Darstellung der Zwischen- und Innersubjekteffekte während der mentalen Vorstellung der Winkelreproduktion (M9) sowie der anschließenden Ruhephase (M10 – Augen geschlossen).....	114
Tab. 6: Neuromuskuläre Aktivität (iEMG [V]) in MW ± SD der an der Extension.....	118
Tab. 7: Darstellung der Zwischen- und Innersubjekteffekte während der mentalen Vorstellung der Winkelreproduktion (M9) sowie der anschließenden Ruhephase (M10 – Augen geschlossen).....	135