

Einfluss von Geschlechtsdimorphismus, Leistungsfähigkeit und Alter auf die  
Belastungs- und Erholungskinetik nach standardisierten, lokomotorischen  
Intervallbelastungen

## **Dissertation**

zur Erlangung des  
Doktorgrades der Philosophie (Dr. phil.)

vorgelegt

der Philosophischen Fakultät II  
Philologien, Kommunikations- und Musikwissenschaften  
Institut für Sportwissenschaft

der Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg,

von Herrn Martin Möhle

geb. am 20.04.1986 in Zittau

1. Gutachter: Prof. Dr. Kuno Hottenrott
2. Gutachter: Prof. Dr. Oliver Stoll

Datum der Verteidigung: 02.02.2022

Halle (Saale), Juni 2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	IV
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	XIV
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	XVI
<b>1 Einleitung und Problemstellung</b> .....	2
<b>2 Wissenschaftlicher Forschungsstand</b> .....	5
2.1 Geschlechtsspezifische Unterschiede.....	5
2.1.1 Muskulatur .....	5
2.1.2 Laktatbildung und Laktatabbau .....	8
2.1.3 Herz-Kreislauf-System.....	9
2.1.4 Ventilation.....	11
2.1.5 Beanspruchungs- und Erholungskinetik.....	12
2.2 Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit.....	14
2.2.1 Muskulatur .....	15
2.2.2 Laktatbildung und Laktatabbau .....	17
2.2.3 Herz-Kreislauf-System.....	20
2.2.4 Ventilation.....	22
2.2.5 Beanspruchungs- und Erholungskinetik.....	24
2.3 Altersspezifische Unterschiede .....	28
2.3.1 Muskulatur .....	28
2.3.2 Laktatbildung und Laktatabbau .....	30
2.3.3 Herz-Kreislauf-System.....	31
2.3.4 Ventilation.....	32
2.3.5 Beanspruchungs- und Erholungskinetik.....	34
2.4 Wingate Anaerobic Test .....	37
2.5 Hochintensives Intervalltraining.....	40
2.5.1 Definition und Anwendungsgebiete.....	40
2.5.2 Trainingsmethodik und Zielstellung.....	41
2.5.3 Auswirkungen eines HIIT auf die Ausdauerleistungsfähigkeit .....	45

<b>3 Zielstellung und Arbeitshypothesen</b> .....	48
<b>4 Untersuchungsmethodik</b> .....	53
4.1 Probandenkollektiv .....	54
4.2 Untersuchungsdesign.....	55
4.3 Verwendete Messsysteme und Datenauswertung .....	61
4.4 Statistische Auswertung .....	70
<b>5 Ergebnisse</b> .....	72
5.1 Einfluss des Geschlechts auf abhängige Untersuchungsvariablen .....	72
5.1.1 Physikalische Leistung, Ermüdung sowie Erholung .....	72
5.1.2 Pausenlänge.....	87
5.1.3 Belastungs- und Erholungsherzfrequenzverhalten .....	92
5.1.4 Laktatverhalten .....	96
5.2 Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf abhängige Untersuchungsvariablen.....	100
5.2.1 Physikalische Leistung, Ermüdung sowie Erholung .....	101
5.2.2 Pausenlänge.....	118
5.2.3 Belastungs- und Erholungsherzfrequenzverhalten .....	122
5.2.4 Laktatverhalten .....	127
5.3 Einfluss des Alters auf abhängige Untersuchungsvariablen .....	131
5.3.1 Physikalische Leistung, Ermüdung sowie Erholung .....	132
5.3.2 Pausenlänge.....	148
5.3.3 Belastungs- und Erholungsherzfrequenzverhalten .....	152
5.3.4 Laktatverhalten .....	156
<b>6 Diskussion und Methodenkritik</b> .....	160
<b>7 Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	195
<b>8 Zusammenfassung</b> .....	201
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	205
<b>Anhang</b> .....	228

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. Trainingsmethodische Struktur zur Entwicklung und Ausprägung der wettkampfspezifischen Ausdauer im Leistungssport .....	42
Abb. 2. Darstellung des Studiendesigns.....	56
Abb. 3. Testdurchführung WAnT mit Messzeitpunkten .....	58
Abb. 4. Testdurchführung des WAnT auf dem Radergometer .....	60
Abb. 5. Portable Spirometrie Metalyzer 3B mit Software MetaSoft Studio.....	61
Abb. 6. Polar-Uhr RS800 CX.....	62
Abb. 7. Analysegerät SUPER GL ambulance .....	63
Abb. 8. Hochleistungsradergometer FES E2000 S .....	64
Abb. 9. Mobil-O-Graph mit Armmanschette .....	65
Abb. 10. IDIAG Moxy - Muskelsauerstoff-Monitor .....	66
Abb. 11. 4-Punkt-Waage Tanita BC-545N .....	67
Abb. 12. Body Impedance Analyzer .....	67
Abb. 13. OptoJump.....	68
Abb. 14. Handdynamometer zur Kraftmessung .....	69
Abb. 15. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	74
Abb. 16. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	74
Abb. 17. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	75
Abb. 18. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	76
Abb. 19. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	76

Abb. 20. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall <sub>WAnT</sub> bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen Männern und Frauen .....	77
Abb. 21. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	78
Abb. 22. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	79
Abb. 23. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	80
Abb. 24. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	80
Abb. 25. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	81
Abb. 26. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen Männern und Frauen .....	81
Abb. 27. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	83
Abb. 28. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	83
Abb. 29. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	84
Abb. 30. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	85
Abb. 31. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen .....	86
Abb. 32. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen Männern und Frauen .....	86

Abb. 33. Mittelwerte mit Standardabweichung der maximalen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	88
Abb. 34. Mittelwerte mit Standardabweichung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	89
Abb. 35. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls aller vier WAnTs zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	90
Abb. 36. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls vom ersten zum vierten WAnT zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	91
Abb. 37. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von einer Minute (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen .....	92
Abb. 38. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von einer Minute nach den WAnTs (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen .....	93
Abb. 39. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von drei Minuten (P1_1, P1_3, P2_1, P2_3, P3_1, P3_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen .....	94
Abb. 40. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von drei Minuten nach den WAnTs (P1_1, P1_3, P2_1, P2_3, P3_1, P3_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen ..	94
Abb. 41. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von zehn Minuten (P1_1, P1_10, P2_1, P2_10, P3_1, P3_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen .....	95
Abb. 42. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von zehn Minuten nach den WAnTs (P1_1, P1_10, P2_1, P2_10, P3_1, P3_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen .....	96

Abb. 43. Durchschnittliche Laktatkonzentration in Ruhe (R), nach den vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen bei unterschiedlichen aktiven Pausenzeiten. A: eine Minute Pausenzeit, B: drei Minuten Pausenzeit, C: zehn Minuten Pausenzeit inklusive Laktatkonzentration am Ende der Pause (P1, P2, P3) .....	99
Abb. 44. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Blutlaktatabbaus innerhalb der 15-minütigen aktiven Erholungsphase zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten .....	100
Abb. 45. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	103
Abb. 46. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	104
Abb. 47. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	104
Abb. 48. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	105
Abb. 49. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten.....	106
Abb. 50. Korrelation der Ausdauerleistungsfähigkeit (Perzentil $VO_{2max}$ ) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	106
Abb. 51. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	107
Abb. 52. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	108
Abb. 53. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	109

Abb. 54. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	110
Abb. 55. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	110
Abb. 56. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	111
Abb. 57. Korrelation der Ausdauerleistungsfähigkeit (Perzentil $VO_{2max}$ ) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	112
Abb. 58. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	112
Abb. 59. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	114
Abb. 60. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	114
Abb. 61. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	115
Abb. 62. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	116
Abb. 63. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	116
Abb. 64. Korrelation der Ausdauerleistungsfähigkeit (Perzentil $VO_{2max}$ ) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	117



Abb. 65. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	117
Abb. 66. Mittelwerte mit Standardabweichung der maximalen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten .....	118
Abb. 67. Mittelwerte mit Standardabweichung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten .....	119
Abb. 68. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls aller vier WAnTs zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten .....	120
Abb. 69. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls vom ersten zum vierten WAnT zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten .....	121
Abb. 70. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von einer Minute (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	123
Abb. 71. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von einer Minute nach den WAnTs (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	123
Abb. 72. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von drei Minuten (P1_1, P1_3, P2_1, P2_3, P3_1, P3_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	124
Abb. 73. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von drei Minuten nach den WAnTs (P1_1, P1_3, P2_1, P2_3, P3_1, P3_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	125

Abb. 74. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von zehn Minuten (P1_1, P1_10, P2_1, P2_10, P3_1, P3_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	126
Abb. 75. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von zehn Minuten nach den WAnTs (P1_1, P1_10, P2_1, P2_10, P3_1, P3_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern .....	127
Abb. 76. Durchschnittliche Laktatkonzentration in Ruhe (R), nach den vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut trainierten und gut trainierten Sportlern bei unterschiedlichen aktiven Pausenzeit. A: eine Minute Pausenzeit, B: drei Minuten Pausenzeit, C: zehn Minuten Pausenzeit inklusive Laktatkonzentration am Ende der Pause (P1, P2, P3).....	130
Abb. 77. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Blutlaktatabbaus innerhalb der 15-minütigen aktiven Erholungsphase zwischen sehr gut trainierten und gut trainierten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	131
Abb. 78. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	133
Abb. 79. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern.....	134
Abb. 80. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	135
Abb. 81. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern.....	135
Abb. 82. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	136
Abb. 83. Korrelation des Alters und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen jungen und alten Sportlern.....	137
Abb. 84. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen jungen und alten Sportlern .....	137

Abb. 85. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	138
Abb. 86. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern.....	139
Abb. 87. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	140
Abb. 88. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern.....	140
Abb. 89. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	141
Abb. 90. Korrelation des Alters und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen jungen und alten Sportlern.....	142
Abb. 91. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall <sub>WAnT</sub> bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen jungen und alten Sportlern .....	142
Abb. 92. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	144
Abb. 93. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern.....	144
Abb. 94. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	145
Abb. 95. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern.....	145
Abb. 96. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	146
Abb. 97. Korrelation des Alters und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen jungen und alten Sportlern .....	147
Abb. 98. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen jungen und alten Sportlern .....	147

Abb. 99. Mittelwerte mit Standardabweichung der maximalen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	148
Abb. 100. Mittelwerte mit Standardabweichung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	149
Abb. 101. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls aller vier WAnTs zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	150
Abb. 102. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls vom ersten zum vierten WAnT zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.....	151
Abb. 103. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von einer Minute (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	152
Abb. 104. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von einer Minute nach den WAnTs (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	153
Abb. 105. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von drei Minuten (P1_1, P1_3, P2_1, P2_3, P3_1, P3_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern.....	154
Abb. 106. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von drei Minuten nach den WAnTs (P1_1, P1_3, P2_1, P2_3, P3_1, P3_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	154
Abb. 107. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von zehn Minuten (P1_1, P1_10, P2_1, P2_10, P3_1, P3_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	155
Abb. 108. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von zehn Minuten nach den WAnTs (P1_1, P1_10, P2_1, P2_10, P3_1, P3_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern .....	156

Abb. 109. Durchschnittliche Laktatkonzentration in Ruhe (R), nach den vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern bei unterschiedlichen aktiven Pausenzeiten. A: eine Minute Pausenzeit, B: drei Minuten Pausenzeit, C: zehn Minuten Pausenzeit inklusive Laktatkonzentration am Ende der Pause (P1, P2, P3)..... 159

Abb. 110. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Blutlaktatabbaus innerhalb der 15-minütigen aktiven Erholungsphase zwischen sehr gut trainierten und gut trainierten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten..... 160

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1. <i>Detaillierte Darstellung der einzelnen Muskelfasertypen mit den entsprechenden Eigenschaften (mod. aus Raeder, Vuong &amp; Ferrauti in Ferrauti, 2020, S. 200) .....</i>	6
Tab. 2. <i>Geschlechtsspezifische unterschiedliche Befunde des kardiologischen Systems von Mann und Frau (Wolf, 2010, S. 243) .....</i>	10
Tab. 3. <i>Geschlechtsspezifische unterschiedliche Befunde des respiratorischen Systems von Mann und Frau (Wolf, 2010, S. 243) .....</i>	11
Tab. 4. <i>Unterschiede zwischen Untrainierten und Sportlern in Ruhe und unter Belastung (Gekle et al., 2015) .....</i>	21
Tab. 5. <i>Alters- und geschlechtsspezifische Verteilung der Muskelmasse in Prozent .....</i>	28
Tab. 6. <i>Sauerstoffverbrauch und die bestimmenden Faktoren bei maximaler Ausdauerbelastung bei trainierten Männern (Tanaka &amp; Seals, 2008).....</i>	31
Tab. 7. <i>Vergleich der Leistungen der männlichen und weiblichen Probanden – wahrscheinlicher relativer Rückgang mit dem steigendem Lebensalter (nach Loe et al., 2013).....</i>	33
Tab. 8. <i>Normwerte für die maximale Leistung (in Watt) beim Wingate Anaerobic Test (nach Maud &amp; Shultz, 1989).....</i>	39
Tab. 9. <i>Normwerte für die durchschnittliche Leistung (in Watt) beim Wingate Anaerobic Test (nach Maud &amp; Shultz, 1989).....</i>	39
Tab. 10. <i>Anthropometrische Daten und <math>VO_{2max}</math>-Werte aller Studienteilnehmer mit Mittelwerten und Standardabweichungen .....</i>	55
Tab. 11. <i>Geschlechtsspezifische Charakterisierung des Probandenkollektivs .....</i>	72
Tab. 12. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit einer Minute Pausenzeit von Männern und Frauen .....</i>	73
Tab. 13. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit von Männern und Frauen .....</i>	78
Tab. 14. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit von Männern und Frauen .....</i>	82

Tab. 15. <i>Ergebnisse des Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für den Innersubjektfaktor %Leistungsabfall</i> .....	91
Tab. 16. <i>Ausdauerspezifische Charakterisierung des Probandenkollektivs</i> .....	101
Tab. 17. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit einer Minute Pausenzeit von sehr gut und gut ausdauertrainierten Probanden</i> .....	102
Tab. 18. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit von sehr gut und gut ausdauertrainierten Probanden</i> .....	108
Tab. 19. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit von sehr gut und gut ausdauertrainierten Probanden</i> .....	113
Tab. 20. <i>Ergebnisse des Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für den Innersubjektfaktor %Leistungsabfall</i> .....	122
Tab. 21. <i>Altersspezifische Charakterisierung des Probandenkollektivs</i> .....	132
Tab. 22. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit einer Minute Pausenzeit von jungen und alten Sportlern</i> .....	133
Tab. 23. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit von jungen und alten Sportlern</i> .....	138
Tab. 24. <i>Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit von jungen und alten Sportlern</i> .....	143
Tab. 25. <i>Ergebnisse des Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für den Innersubjektfaktor %Leistungsabfall</i> .....	151

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BMI	Body-Mass-Index
bzw.	beziehungsweise
CK	Creatin-Kinase
FM	Fettmasse
Hb	Hämoglobin
HF	Herzfrequenz
HF <sub>max</sub>	maximale Herzfrequenz
HIIT	Hochintensives Intervalltraining
kcal/d	Kilokalorien pro Tag
KF	Körperfettanteil
kg	Kilogramm
l	Liter
LDH	Laktatdehydrogenase
min	Minuten
ml	Milliliter
mmol/l	Millimol pro Liter
MW	Mittelwert
n	Probandenzahl
NN	Normalnull
RER	Respiratory Exchange Ratio
RQ	Respiratorischer Quotient
SD	Standardabweichung
S/min	Schläge pro Minute
Tab.	Tabelle
U/min	Umdrehungen pro Minute
VE	Atemminutenvolumen
VCO <sub>2</sub>	Kohlendioxidabgabe
VO <sub>2</sub>	Sauerstoffaufnahme
VO <sub>2max</sub>	Maximale Sauerstoffaufnahme
vs.	versus
vVO <sub>2max</sub>	Geschwindigkeit bei maximaler Sauerstoffaufnahme
WAnT	Wingate Anaerobic Test
z.B.	zum Beispiel



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation tatkräftig unterstützt haben und die Erstellung dieser Arbeit überhaupt erst ermöglichten.

Mein ganz besonderer Dank gilt dabei meinem Doktorvater Prof. Dr. Kuno Hottenrott für die enorme Unterstützung bei der Durchführung der gesamten Arbeit in den vergangenen Jahren. Er stand mir dabei jederzeit mit Rat und Tat zur Seite sowie unterstützte mich mit vielen wertvollen Anregungen.

Insbesondere möchte ich Sascha Ketelhut für die unheimliche Unterstützung danken. Nicht nur als Arbeitskollege sondern auch als sehr guter Freund konnte ich mich Tag und Nacht an ihn wenden, um wertvolle Hilfe bei der Konzipierung und Verfassung der Arbeit zu erhalten.

Eine ganz besondere Stellung nimmt in jeglicher Hinsicht meine Familie ein. Ohne ihre grenzenlose Unterstützung, Rücksichtnahme und Fürsorge wäre diese Dissertation niemals möglich gewesen. Meinen Eltern und meiner Freundin gilt daher in ganz besonderem Maße meine Dankbarkeit.

# 1 Einleitung und Problemstellung

Das hochintensive Intervalltraining (kurz: HIIT) hat in den letzten 15 Jahren nicht nur als verbreitete Trainingsmethode im Leistungs- und Breitensport Einzug gehalten, sondern findet auch immer häufiger in dem Präventions- und Rehabilitationsbereich seine Anwendung. Die stetig steigende Anzahl an nationalen sowie internationalen wissenschaftlichen Studien zu der Wirksamkeit der Trainingsmethodik lassen immer detailliertere Erkenntnisse zu den physiologischen Reaktionen zu und bestätigen die Bedeutsamkeit sowohl für den Leistungs- und Breitensport als auch für den Gesundheitsbereich. Die Gründe für die hohe Beliebtheit des HIIT sind dabei sehr vielschichtig. Hochintensive Intervalltrainingsprogramme werden zunehmend im Leistungs- und Breitensport gezielt zur Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit, sowie zur Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2max}$ ) eingesetzt (Helgerud et al., 2007). Vor allem in den Ausdauersportarten bedarf es ab einem fortgeschrittenen Leistungsniveau einer Erhöhung der Intensitäten und Trainingsreize innerhalb des Trainingsprozesses, um eine kontinuierliche Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit erzielen zu können. Auch in den Spielsportarten, wie Handball, Fußball und Basketball gehören HIIT-Programme sowohl in der Vorbereitungs- als auch Wettkampfphase zu den häufig angewendeten Trainingsmitteln. Die intermittierende Belastungsstruktur dieser Sportarten stellt dabei das zentrale Kennzeichen des konditionellen Anforderungsprofils an die Sportler<sup>1</sup> dar. Daher ist es für eine stetige Leistungsentwicklung unabdingbar diese Belastungen im Trainingsprozess abzubilden. Auch im Bereich der Prävention und Rehabilitation, in Bezug auf unterschiedliche Krankheitsbilder weist diese Trainingsform eine hohe Bedeutung auf. Das wird durch eine Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen in den vergangenen Jahren belegt. Dabei zeigt sich, dass ein HIIT vergleichbare und teilweise sogar größere positive Veränderungen der Krankheitsbilder und Anpassungen mit geringerer Trainingszeit erzielen kann als ein klassisches Ausdauertraining (Amundsen et al., 2008; Tjønnå et al., 2008). Weiterhin führt ein Großteil der Menschen Zeitnot als Hauptursache für geringe sportliche Betätigung an. Allein aus Gründen der Zeitersparnis ist diese Trainingsmethodik daher im Freizeitsport und Präventionsbereich von großer Relevanz. Denn Studien im Freizeit- und Leistungssport belegen, dass HIIT in vergleichsweise geringer Trainingszeit ähnliche oder teils höhere Effekte auf wesentliche Gesundheits- und Leistungsindikatoren im Vergleich zu einem niedrigintensivem Ausdauertraining (Grundlagenausdauertraining) hat (Gillen & Gibala, 2014; Sperlich et al., 2013). Weiterhin ist das HIIT in allen Altersklassen anwendbar. Vor einigen Jahren war ein hochintensives Intervalltraining im Kindesalter sehr kritisch betrachtet worden und eher unerwünscht.

---

<sup>1</sup> In der folgenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die männliche Form verwendet. Die Form bezieht sich auf Personen beiderlei Geschlechts.

Allerdings konnten eine Vielzahl an Interventionsstudien im Kindes- und Jugendalter von 9 bis 17 Jahren eine Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme, der Sprint- und Sprungleistung, sowie eine Verbesserung der komplexen sportartspezifischen Leistungsfähigkeit feststellen (Helgerud et al., 2001; McMillan et al., 2005; Sperlich et al., 2011). Des Weiteren gibt es Erkenntnisse, dass durch ein hochintensives Intervalltraining wesentliche gesundheitliche Risikofaktoren, das Körpergewicht und die Körperzusammensetzung positiv beeinflusst werden. Aufgrund dieser Ergebnisse plädieren Wissenschaftler für ein HIIT im Nachwuchsleistungssport, im Kinder- und Jugendsport sowie im Schulsport (Engel et al., 2018; Engel & Sperlich, 2014). Die vielschichtigen Anwendungsgebiete des HIIT bedürfen daher einer individuellen Strukturierung des Trainings, die möglicherweise das Geschlecht, das kalendarische Alter und den Leistungsstand berücksichtigen. Generell treten im Aufbau der HIIT-Programme grundlegend große Unterschiede hinsichtlich der Belastungsintensität, Intervallbelastungsdauer, Wiederholungsanzahl sowie der Erholungszeit zwischen den einzelnen Intervallen auf. Somit werden unterschiedliche trainingsmethodische Ziele verfolgt. Wissenschaftliche Ergebnisse zeigen dabei, dass die Dauer der Erholungszeit die maximale Leistung bei den Belastungsintervallen und die gesamtorganismische Beanspruchung beeinflussen (Hebestreit et al., 1993). Weiterhin unterscheidet sich die maximale Leistung bei den HIIT-Programmen zwischen Frauen und Männern. Für die auftretenden Unterschiede werden verschiedene Faktoren benannt. Perez-Gomez et al. (2008) begründen die geschlechtsspezifische Ergometer-Test-Leistung (Wingate Anaerobic Test) mit der geringeren Muskelmasse in den unteren Extremitäten der Frauen. Weitere Studien haben metabolische Unterschiede (Ruby et al., 2002) und Unterschiede in der Verteilung der Typ-II Muskelfasern (Glenmark et al., 1992) zwischen Männern und Frauen aufgezeigt. Jedoch gibt es bisher nur wenige wissenschaftliche Erkenntnisse, die sich mit den Erholungszeiten während und nach intermittierenden Ausdauerbelastungen bei Männern und Frauen beschäftigen. Esbjörnsson-Liljedahl et al. (2002) haben bei wiederholten Radergometer-Sprints über 30 Sekunden (WAnT mit jeweils 20 Minuten Pause) eine schnellere Erholung bei Frauen zeigen können und haben in Muskelbiopsien eine schnellere ATP-Resynthese während dieser Erholungsphasen bei Frauen gemessen. Entsprechend gibt es Hinweise, dass sich die Regeneration zwischen Männern und Frauen während und nach hohen Belastungen unterscheidet. Es wurde jedoch nicht geklärt, welchen Einfluss unterschiedliche Erholungszeiten in Abhängigkeit des Geschlechts auf die Wiederherstellung der Leistung haben, inwieweit die Erholungszeit einen Einfluss auf die Trainingsleistung sowie auf die Trainingsadaptation hat und welche Rolle dabei das Alter sowie die Ausdauerleistungsfähigkeit des Sportlers spielt. Hier deuten ebenfalls mehrere Studien darauf hin, dass die Erholungszeit altersabhängig ist und mit dem Alter zunimmt beziehungsweise sich bei besser ausgebildeter Ausdauerleistungsfähigkeit verkürzt. Aus dem Übersichtsartikel von Fell & Williams (2008) lassen sich als Mechanismen für eine beeinträchtigte Regeneration mit

zunehmendem Alter eine höhere Anfälligkeit „älterer“ Muskeln für trainingsinduzierte Skelettmuskelschäden oder auch langsamere Reparatur- und Anpassungsreaktionen nennen. Jedoch kritisieren die Autoren berechtigterweise, dass bei den bisherigen Studien nicht die unterschiedliche Leistungsfähigkeit zwischen jüngeren und älteren Sportlern berücksichtigt wurde und daher viele Fragen ungeklärt bleiben. Insgesamt zeigen die Recherchen, dass der geschlechts- und altersspezifische Einfluss auf den Erholungsverlauf bei trainierten jüngeren und älteren Sportlern völlig unzureichend erforscht ist. Infolgedessen gibt es bei HIIT-Programmen im Leistungs- und Gesundheitssport keine geschlechtsspezifische Erholungs- bzw. Pausenzeitgestaltung sowie altersabhängige Empfehlungen. Aufgrund der verschiedenen offenen Fragen besteht die Notwendigkeit, die Belastungs- und Erholungskinetik während und nach standardisierten, lokomotorischen Intervallbelastungen mit unterschiedlichen Pausenzeiten in Abhängigkeit von Geschlecht, Leistungsfähigkeit und Alter näher zu untersuchen. Zur Klärung des Sachverhaltes werden daher im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit zunächst der wissenschaftliche Forschungsstand hinsichtlich des Einflusses von Geschlecht, der Ausdauerleistungsfähigkeit und des Alters auf die Muskulatur, die Laktatbildung und den Abbau, das Herz-Kreislauf-System, das ventilatorische System sowie die Beanspruchungs- und Erholungskinetik detailliert dargestellt. Anschließend wird der Wingate-Anaerobic-Test (WAnT) als diagnostisches Mittel näher erläutert und das hochintensive Intervalltraining mit seinen Anwendungsgebieten und den Auswirkungen auf die Ausdauerleistungsfähigkeit aufgearbeitet. Als Konsequenz aus der theoretischen Grundbetrachtung werden anschließend im dritten Kapitel die zentralen Fragestellungen und die wissenschaftlichen Arbeitshypothesen abgeleitet. Nachfolgend wird im vierten Kapitel das methodische Vorgehen zur Untersuchung ausführlich erläutert. Dabei beinhaltet der Abschnitt die detaillierte Darstellung des Probandenkollektivs, das Untersuchungsdesign, die Auswahl der genutzten Messgeräte mit den jeweils erhobenen Parametern und den detaillierten Ablauf der einzelnen Testtage. Anschließend wird das statistische Vorgehen zur Auswertung der erhobenen Daten erläutert. In dem folgenden fünften Kapitel werden die Ergebnisse deskriptiv und grafisch sowie inferenzstatistisch präsentiert, bevor im sechsten Kapitel die entsprechenden Ergebnisse vor dem Hintergrund des aktuellen wissenschaftlichen Forschungsstandes diskutiert und das methodische Vorgehen kritisch betrachtet werden. Das siebente Kapitel enthält auf Grundlage der Ergebnisse Schlussfolgerungen für die Trainingspraxis, sowie einen Ausblick zu fortführenden Untersuchungen und Forschungsfragen, bevor im letzten Kapitel eine Zusammenfassung der wissenschaftlichen Studie erfolgt.

## 2 Wissenschaftlicher Forschungsstand

### 2.1 Geschlechtsspezifische Unterschiede

Grundlegend gibt es bereits bei der Geburt anthropometrische Unterschiede zwischen Männern und Frauen, die sich letztendlich in einer differentiellen Entwicklung beider Geschlechter niederschlägt. Somit sind Jungen bei Geburt bereits 1,4 % größer und 3,8 % schwerer als Mädchen. Im Unterschied dazu sind Mädchen den Jungen allerdings bereits zwei Wochen im Entwicklungsprozess voraus, in der Pubertät sind es dann sogar zwei Jahre. Die frühere Pubertätsentwicklung hat zur Folge, dass Mädchen deutlich schneller Fettmasse entwickeln, was die Zyklusaktivität und Östrogenproduktion einleitet. Dies führt zu einer beschleunigten Skelettreife, allerdings mit einem leichteren Knochenbau im Vergleich zu den Jungen (Theintz et al., 1992). Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Geschlechtern stellt der Körperbau dar. Frauen weisen einen deutlich rumpfbetonteren Körperbau auf, währenddessen der von Männern eher extremitätenbetont ist. Dabei beträgt die Rumpflänge von Frauen ungefähr 38 % der Körpergröße und die der Männer lediglich ca. 35 %. Daraus resultiert, dass die Extremitäten bei Frauen ungefähr 10 % kürzer sind als bei Männern. Der große Unterschied in der knöchernen Beckengestalt zwischen Männern und Frauen führt zu veränderten Drehwirkungen bei der Kraftübertragung durch die Muskulatur zwischen Becken und den unteren Extremitäten (Vgl. Wolf, 2010, S. 241).

#### 2.1.1 Muskulatur

Die Verteilung von Fettgewebe und Muskulatur weist eine große Divergenz zwischen beiden Geschlechtern auf. Frauen haben einen durchschnittlichen Anteil von 25 % an Fettgewebe, währenddessen Männer lediglich auf einen mittleren Anteil von 17 % kommen. Die Fettdepots befinden sich dabei bei den Frauen im subkutanen und gluteofemorale Bindegewebe. Frauen haben außerdem eine geringe Muskelmasse als Männer. Bei Frauen beträgt der prozentuale Anteil der Muskulatur ungefähr 35 %, was bei einer 65 kg schweren Person 23 kg Muskelmasse entspricht. Männer weisen einen prozentualen Muskelanteil von 40 % auf, was 35 kg Muskelmasse bei einem 88 kg schweren Mann bedeuten. Der männliche Organismus schließt die Entwicklung der Muskulatur im Zeitraum zwischen dem 23. und dem 27. Lebensjahr ab, bei Frauen zwischen dem 19. und 23. Lebensjahr. Bezüglich der Verteilung und Grundstruktur der Skelettmuskulatur scheint es zwischen beiden Geschlechtern keine nennenswerten Unterschiede zu geben. Die Skelettmuskeln sind willkürlich steuerbare Teile der Muskulatur und gewährleisten die Beweglichkeit des Menschen. Dabei muss die Skelettmuskulatur viele verschiedene Funktionen erfüllen. Aufgrund der molekularen Zusammensetzung, sowie der funktionellen und biochemischen

Eigenschaften können ganz allgemein drei Muskelfasertypen unterschieden werden (Bottinelli & Reggiani, 2000):

1. Langsamzuckende und ermüdungsresistente Fasern (Typ I – Slow-Twitch-Fasern)
2. Schnellzuckende aber relativ ermüdungsresistente Fasern (Typ IIa – Fast-Twitch-Fasern)
3. Schnellzuckende Fasern und schnell ermüdend (Typ IIx)

Die einzelnen Muskelfasertypen unterscheiden sich dabei grundsätzlich in der Funktionsweise, der Morphologie, dem Metabolismus, sowie der spezifischen Anpassungsreaktionen an Trainingsreize (s. Tab. 1).

Tab. 1. Detaillierte Darstellung der einzelnen Muskelfasertypen mit den entsprechenden Eigenschaften (mod. aus Raeder, Vuong & Ferrauti in Ferrauti, 2020, S. 200)

		<b>Typ I (langsam)</b>	<b>Typ IIa (oxidativ)</b>	<b>Typ IIx (glykolytisch)</b>
<b>Funktion</b>	Rekrutierungsschwelle	gering	mittel bis hoch	hoch
	Kontraktionsgeschwindigkeit	langsam	schnell	sehr schnell
	Kontraktionszeit	120-170 ms	40-120 ms	40 ms
	Kraftproduktion	gering	mittel	hoch
	Ermüdungsresistenz	hoch	moderat bis gering	gering
<b>Morphologie</b>	Mitochondriendichte	hoch	mittel	gering
	Kapillardichte	hoch	mittel	gering
	Faserdurchmesser	klein	mittel	groß
<b>Metabolismus</b>	Vornehmliche	aerob	langzeit anaerob	kurzzeitig
	Stoffwechselaktivität			anaerob
	Oxidative Kapazität	hoch	mittel	gering
	Glykolytische Kapazität	gering	hoch	hoch

In der Verteilung der Muskelfaserzahl, bezogen auf schnell- und langsamzuckende Muskelfasern besteht in der Wissenschaft keine einheitliche Ansicht, ob geschlechtsspezifische Unterschiede vorliegen. Grundlegend zeigt sich allerdings bei Betrachtung der Studienlage, dass die Männer eine höhere Streuung in der Verteilung aufweisen. Der Mittelwert befindet sich bei 50 %, allerdings ist das Verhältnis stark von der Sportart abhängig. Weltklasseathleten aus schnellkraft- und schnelligkeitsdominierten Disziplinen weisen einen deutlich höheren Prozentsatz an schnellen Muskelfasern auf, während Langstreckenläufer einen höheren Anteil an langsamen Muskelfasern besitzen (Costill et al., 1976). Die langsamzuckenden Typ-I-Fasern gewinnen ihre Energie über den aeroben Energiestoffwechsel. Sie zeichnen sich durch einen hohen Gehalt an Myoglobin und Mitochondrien aus (Raeder, Vuong

& Ferrauti, 2020). Das Mitochondrienvolumen ist dabei im geschlechtsspezifischen Vergleich bei der Frau um 20 % geringer (Hollmann et al., 2002). Solche myoglobinreichen Fasern besitzen eine rote Farbgebung. Zu den „roten“ Muskeln gehört z.B. auch der musculus soleus in der Wade. Deshalb ist dieser z.B. besonders gut für Halteleistungen geeignet. Die Typ-I-Fasern entwickeln bei Einzelzuckungen eine geringe Kontraktionskraft. Der Kraftanstieg in diesen Muskelfasern ist langsam. Die Kontraktionskraft kann jedoch über lange Zeit aufrechterhalten werden (Raeder, Vuong & Ferrauti, 2020). Die Typ-IIx-Fasern hingegen betreiben einen glykolytischen Stoffwechsel, besitzen wenige Mitochondrien, zucken schnell und ermüden zügig. In ihnen findet sich nur ein geringer Anteil an Myoglobin, weshalb sie weiß erscheinen. Die Typ-IIx-Fasern entwickeln eine sehr hohe Kontraktionskraft mit schnellem Kraftanstieg und einer schnellen Ermüdung. Diese Fasern werden vor allem bei schnellen und kraftvollen Bewegungen zugeschaltet, gewinnen ATP hauptsächlich anaerob und akkumulieren in kurzer Zeit Laktat. Die Typ-IIa-Fasern besitzen einen mittleren Myoglobingehalt, haben einen mittleren Gehalt an Mitochondrien, zucken schnell und sind relativ ermüdungsresistent. Sie betreiben einen oxidativen (begrenzt glykolytischen) Stoffwechsel. Die Typ-IIa-Fasern entwickeln bei Einzelzuckungen eine mittlere Kontraktionskraft. Sie kontrahieren schnell, können die Kontraktionskraft jedoch auch über eine lange Zeit aufrechterhalten. Die unterschiedliche Kontraktionsgeschwindigkeit der Muskelfasern wird durch verschiedene Myosin-Isoformen verursacht. Je schneller die jeweilige Myosin-ATPase arbeitet, umso schneller erfolgt die Muskelkontraktion und umso höher ist auch der Energieverbrauch. Deshalb ist der Energieverbrauch der Typ-I- Fasern geringer als der der schnellzuckenden Typ-II-Muskelfasern. Durch Training können Skelettmuskelfasertypen begrenzt ineinander umgewandelt werden. Die Ausbildung von Typ-I-Fasern kann vor allem durch Ausdauertraining gefördert werden, wohingegen der Anteil von Typ-II-Fasern durch Intervall-Sprinttraining begünstigt wird (Gekle et al., 2015). Unterschiede in der Skelettmuskulatur treten weiterhin im Muskelquerschnitt zwischen beiden Geschlechtern auf. Bei Männern kann dieser, aufgrund des höheren Testosteronanteils bis zu 20 % größer sein (Hollmann et al., 2009). Dabei beträgt der Gesamtanteil der Muskelmasse am Gesamtkörpergewicht bei der Frau durchschnittlich 36 % und beim Mann 42 %. Weiterhin ist die absolut gemessene Kraft sämtlicher Muskeln bei der Frau geringer. Diese Aspekte führen zu einem deutlich ungünstigeren Last-Kraft-Verhältnis bei Frauen, was wiederum in deutliche Unterschiede in der Kraftentwicklung einzelner Muskelgruppen resultiert. Beispielsweise ist die Kraft der Unterarmmuskulatur bei Frauen im Vergleich zu Männern um 46 % und die Kraft der Kaumuskulatur um 22 % reduziert (Hollmann et al., 2009). Bei dynamischen Kraftentwicklungen sowie der Schnellkraft, ist der geschlechtsspezifische Unterschied geringer als bei Kraftdisziplinen. Die Divergenzen in der Kraftentwicklung sind allerdings nicht nur durch den unterschiedlichen Testosterongehalt zu erklären, sondern auch durch den teils differenten Trainingszustand der Muskulatur, welche durch eine unterschiedliche Bewegungsintensität im Alltag zu erklären ist. Durch das Erreichen einer

überschwelligen Belastung, wird ein Trainingsreiz erzielt, der zu einem Muskelwachstum und einer Zunahme der Muskelkraft führt (Vgl. Wolf, 2010, S. 241). Gemeinsam mit dem Training fördert das Testosteron die Muskelfaserhypertrophie, vor allem der Typ-II-Fasern (Hollmann et al., 2000). Weiterhin weisen Frauen innerhalb der energieliefernden Elemente der Muskelzelle einen höheren prozentualen Anteil an Lipidtropfen auf, welches eine höhere Aktivität einiger Enzyme des Fettstoffwechsels nach sich zieht. Somit kann die Frau den Fettstoffwechsel besser aktivieren und die Glykogendepots besser schonen (Saltin & Gollnick, 1983).

### *2.1.2 Laktatbildung und Laktatabbau*

Die Bildung der maximalen Laktatkonzentration verläuft bei Männern und Frauen zwischen dem 6. und 18. Lebensjahr nahezu parallel. In der weiteren Lebensspanne sind die maximalen Blutlaktatwerte sehr stark von der ausgeführten Sportart abhängig. Die geschlechtsspezifischen Unterschiede fallen dabei eher geringfügig aus. Sowohl bei Männern als auch Frauen besteht eine nahezu lineare Beziehung zwischen der Milchsäureproduktion und des pH-Wertes im Blut. Der Grund, warum Männer höhere maximale Laktatkonzentrationen in der Ausbelastung erreichen, ist auf den höheren Anteil an Muskelmasse zurückzuführen (Heck, 1990). Grundsätzlich unterscheiden sich die maximalen Laktatkonzentrationen aber je nach Sportart. 400 Meter Läufer erreichen teilweise Laktatwerte von über 20 mmol/l, Marathonläufer absolvieren ihren Wettkampf dahingegen im Bereich von 2 bis 2,5 mmol/l (Föhrenbach, 1986). Im geschlechtsspezifischen Vergleich ist die anaerobe Leistung bei Frauen geringer als bei männlichen Personen. Bezogen auf die Körpergröße, stellt sich dieser Leistungsunterschied zwischen beiden Geschlechtern als geringer heraus, letztlich ist er aber immer noch signifikant. Aufgrund einer kleineren angenommenen Querschnittsfläche der Typ-II-Fasern im Verhältnis zu den Typ-I-Fasern bei Frauen, wird davon ausgegangen, dass die Gesamtaktivität der Laktatdehydrogenase geringer ist (Esbjörnsson et al., 1993). Inwiefern es geschlechtsspezifische Unterschiede im Laktatabbau bei unterschiedlichen Regenerationszeiten gibt, haben Laurent et al. (2014) in einer wissenschaftlichen Studie untersucht. Dabei konnten die Autoren keine signifikanten geschlechtsspezifischen Differenzen in Bezug auf die Laktatkonzentrationen nach kurzen hochintensiven Belastungen feststellen. Bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen den Intervallbelastungen wiesen Frauen und Männer nahezu identische mittlere Laktatkonzentrationen auf. Durch eine Verlängerung der Pausenzeit auf drei Minuten konnten die Wissenschaftler bei den weiblichen Probanden eine durchschnittlich geringere Laktatkonzentration feststellen und bei einer Regenerationslänge von vier Minuten wiesen die Frauen leicht höhere Laktatwerte im Vergleich zu den Männern auf. Auch eine Studie von Eliakim et al. (2014) konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen Männern und Frauen



feststellen. Zwar waren die Nachbelastungslaktatwerte der männlichen Personen höher als bei den Frauen, allerdings waren die Differenzen nicht statistisch. Vincent et al. (2004) konnten in ihrer Studie aufzeigen, dass Frauen und Männer ähnliche Zeitverlaufsmuster in der Laktatkonzentration nach einem WAnT aufweisen. Weiterhin zeigten sie, dass bei beiden Geschlechtern die höchsten Laktatwerte fünf Minuten nach Beendigung des Tests aufgetreten sind. Andere Wissenschaftler konnten vor allem in den maximalen Laktatwerten nach kurzen hochintensiven Belastungen geschlechtsspezifische Unterschiede aufzeigen. So stellten Esbjörnsson et al. (2009) fest, dass Männer eine signifikant höhere Laktatakkumulation nach Sprintbelastungen aufwiesen und die maximalen Laktatwerte um 30 % höher waren, als bei den weiblichen Probanden. In vorherigen Studien fanden Esbjörnsson-Liljedahl et al. (1999) bereits heraus, dass der belastungsinduzierte Anstieg der Blutlaktatkonzentration bei Frauen um 22 % geringer ausfiel als bei männlichen Personen. Gleichzeitig fanden die Wissenschaftler eine erhebliche Reduzierung von ATP, Phosphokreatin und Glykogen in den Typ-I- und Typ-II-Muskelfasern, welche sich allerdings nicht zwischen den Geschlechtern unterschieden. Allerdings konnte eine um 50 % geringere Reduzierung des Glykogens in den Typ-I-Muskelfasern bei Frauen festgestellt werden. Daraus schlussfolgerten die Autoren, dass die belastungsinduzierte Reduzierung des Glykogens bei Frauen abgeschwächerter auftritt und dass die faser- sowie geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Stoffwechselreaktion auf Sprintbelastungen Auswirkungen auf Trainingsprogramme speziell für Männer und Frauen haben sollten.

### *2.1.3 Herz-Kreislauf-System*

Die geschlechtsspezifischen Unterschiede im kardiovaskulären System sind grundlegend durch anthropometrische Veranlagungen gekennzeichnet. Somit besitzen Frauen ein kleineres Herz mit einem geringeren Gewicht als Männer. Daraus resultieren bei weiblichen Personen ein kleineres Herzvolumen, kleineres Schlagvolumen sowie kleineres Herzminutenvolumen in Ruhe und Belastung. Weitere morphologische und strukturelle Unterschiede zeigen sich in der Dicke der Herzkammern sowie im Aortendurchmesser. So weisen sehr gut ausdauertrainierte Männer eine Herzwanddicke von 14 mm auf und Frauen 11 mm. Diese Unterschiede sind ebenfalls in der Dicke der rechten (35 vs. 28 mm) und linken Herzkammer (65 vs. 58 mm) ersichtlich (Berkel, 1997). Neben der geringeren Herzmasse haben Frauen eine um 55 % geringere Ejektionsfraktion als Männer. Um diesen Nachteil zu kompensieren, weist das weibliche Herz bei gleicher Leistung eine höhere Herzfrequenz auf. Daraus resultiert auch, dass weibliche Personen eine höhere Ruheherzfrequenz besitzen (s. Tab. 2). Weiterhin zeigte sich in einer Studie von Hottenrott & Neumann (2012), dass es bei der maximalen Herzfrequenz während eines Feldstufentests zu keinen geschlechtsspezifischen Unterschieden gekommen

ist. Allerdings wiesen die Frauen bei submaximalen Ausdauerbelastungen signifikant höhere Herzfrequenzwerte auf. So lag die Differenz zwischen Männern und Frauen bei einer Laktatkonzentration von 2 mmol/l bei 10 Schlägen pro Minute und bei 4 mmol/l bei durchschnittlich 7 Schlägen pro Minute. Mit zunehmender Laufgeschwindigkeit nahm der geschlechtsspezifische Unterschied immer weiter ab. Bei einer Laktatkonzentration von 5 mmol/l betrug die Herzfrequenz-Differenz nur noch 2,9 Schläge pro Minute. Die funktionelle Adaptationsfähigkeit des kardiovaskulären Systems auf Trainingsreize ist bei beiden Geschlechtern allerdings nahezu gleich. Trainingsbedingte Leistungsverbesserungen und Anpassungen finden bei Frauen und Männern in gleichen prozentualen Größenordnungen statt. Dies gilt zum einen für die Herzgröße und zum anderen für die Herzfunktion (Schlagvolumen), die maximal erreichbare arteriovenöse O<sub>2</sub>-Differenz sowie die Vergrößerung der Kapillarzahl in der trainierten Muskulatur (Vgl. Hollmann et al., 2002, S. 13).

Tab. 2. *Geschlechtsspezifische unterschiedliche Befunde des kardiologischen Systems von Mann und Frau (Wolf, 2010, S. 243)*

<b>Biologische Größe</b>	<b>Frau</b>	<b>Mann</b>
Herzgewicht	250-300 g (4,8 g/kg)	300-350 g (5,7 g/kg)
Herzvolumen	500-600 ml (9,5-10 ml/kg)	600-800 ml (11-12 ml/kg)
Schlagvolumen Ruhe (max. Belastung)	40-50 ml (70-90 ml)	60-80 ml (110-130 ml)
Herzminutenvolumen Ruhe (max. Belastung)	3-5 l (12-14 l)	4-6 l (18-20 l)
Ruheherzfrequenz	60-80 S/min	50-70 S/min

Zusätzlich besitzen Frauen einen geringeren Hämoglobingehalt im Blut. Der prozentuale Anteil beträgt nur 75 bis 80 % der Werte von den Männern und kann durch den Menstruationszyklus noch weiter verringert werden (Wolf, 2010). Die Hämoglobinkonzentration des Blutes weist bei der Frauen 12 bis 16 g/dl und beim Mann 13 bis 17,5 g/dl auf (WHO, 2011). Dies hat zur Ursache, dass für jeden Liter Blut, den das Herz beim Mann pumpt ungefähr 13 % mehr Sauerstoff zur arbeitenden Muskulatur geleitet werden kann als bei der Frau. Die geringere Hb-Konzentration im Blut vermindert die Sauerstofftransportkapazität und damit auch die Ausdauerleistungsfähigkeit. Die Abnahme des Hämoglobins um 1 g hat eine Verringerung der VO<sub>2max</sub> um ca. 4 ml/min zur Folge (Prommer & Schmidt, 2009). Somit führt die Abnahme des Hb-Wertes bei einem Ausdauersportler von 15,5 g/dl auf 14,0 g/dl zu einer Leistungseinbuße von 5 % (Vgl. Hottenrott, 2015, S. 3). Des Weiteren ist die arterielle Querschnittsgröße bei Frauen ebenfalls geringer (Kay & Shepard, 1969). Aufgrund des geringeren Herzvolumens, der geringeren Total-Hämoglobinwerte und der geringeren Blutmenge weisen Frauen eine schlechtere aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit auf.

### 2.1.4 Ventilation

Bereits bei dem Atemtypus in Ruhe treten geschlechtsspezifische Unterschiede auf (s. Tab. 3). Frauen weisen primär eine Brustatmung und Männer eine Bauchatmung auf (Wolf, 2010). Weiterhin besitzen Frauen, mit einem Thoraxvolumen von vier Litern gegenüber Männern mit fünf Litern, eine geringere Kapazität. Aufgrund dessen führt dies zu einem deutlich geringeren physiologischen Atemvolumen. Das durchschnittliche Atemvolumen einer Frau beträgt ungefähr 4,5 bis 5 Liter, währenddessen Männer eine durchschnittliche Vitalkapazität von 6,5 bis 7 Liter aufweisen. Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Geschlechtern stellt sich in der Atemfrequenz sowie in den Atemgrenzwerten dar. Die Atemfrequenz bei Frauen beträgt in Ruhe ungefähr 14 bis 18 Atemzüge pro Minute und die der Männer 12 bis 16 Atemzüge pro Minute. Da sich das Atemzugvolumen ebenfalls unterscheidet (400 ml vs. 500 ml) weisen auch die Atemgrenzwerte, mit 110 Liter pro Minute bei Frauen und 160 Liter pro Minute bei Männern eine erhebliche Differenz auf (McArdle et al., 2015).

Tab. 3. Geschlechtsspezifische unterschiedliche Befunde des respiratorischen Systems von Mann und Frau (Wolf, 2010, S. 243)

Biologische Größe	Frau	Mann
Atemtypus (Ruhe)	Brustatmung	Bauchatmung
Atemfrequenz	14-18/min	12-16/min
Atemzugvolumen	ca. 400 ml	ca. 500 ml
Atemgrenzwert	110 l/min	160 l/min
Atemminutenvolumen	90 l/min (1,5 l/kg)	110 l/min (1,6 l/kg)

Der wesentliche leistungslimitierende Parameter bei Frauen im Vergleich zu den Männern ist die maximale Sauerstoffaufnahmekapazität. Während die  $VO_{2max}$ -Werte bis zur Pubertät bei Jungen und Mädchen nahezu identisch verlaufen, steigen die Werte anschließend bei den Männern deutlich steiler an. Frauen erreichen dabei im Alter zwischen 14 und 16 Jahren den Peak-Wert, währenddessen der Mann diesen um das 19. Lebensjahr aufweist. Bis zum 30. Lebensjahr zeigt sich eine Leistungskonstanz in der maximalen Sauerstoffaufnahme, allerdings ist die  $VO_{2max}$  bei der Frau in diesem Zeitraum um 25 bis 33 Prozent geringer. Anschließend erfolgt eine altersbedingte Abnahme und die geschlechtsspezifischen Unterschiede werden kleiner. Die Reduzierung der maximalen Sauerstoffaufnahme weist bis zum 80. Lebensjahr bei den Frauen einen geringeren Abfall auf. Währenddessen der Verlust bei den Männern ein Drittel bis ein Viertel der  $VO_{2max}$  im Altersgang beträgt, ist bei den Frauen im selben Zeitraum ein Rückgang von einem Viertel bis einem Drittel zu verzeichnen. Ab dem 80. Lebensjahr sind dann kaum noch signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen feststellbar (Hollmann et al., 2002). Die relative maximale Sauerstoffaufnahme bei einer gesunden männlichen Person, welche

Normalgewicht und einen durchschnittlichen Leistungsstand besitzt, beträgt zwischen 40 und 55 ml/min/kg ( $3300 \pm 200$  ml/min). Frauen weisen dahingegen eine  $VO_{2max}$  von 32 bis 38 ml/min/kg ( $2000 \pm 200$  ml/min) auf. Männliche Ausdauerleistungssportler können relative Werte von bis zu 85 ml/min/kg (bis zu 7000 ml/min) erreichen, währenddessen weibliche Hochleistungssportler auf eine relative maximale Sauerstoffaufnahme von bis zu 75 ml/min/kg (bis zu 5500 ml/min) kommen. Der geschlechtsspezifische Unterschied ist bei den relativen Werten geringer als bei der absoluten maximalen Sauerstoffaufnahme (Hollmann et al., 2002). Aufgrund der bereits in Kapitel 2.1.1 genannten Tatsache, dass Frauen gegenüber Männern eine verstärkte Fähigkeit der Lipidmetabolisierung besitzen, weisen sie bei submaximalen Belastungen einen geringeren respiratorischen Quotienten als männliche Personen auf. Bei sehr hohen Belastungsintensitäten ist dieser Unterschied nicht mehr nachweisbar (Friedmann & Kindermann, 1989).

### *2.1.5 Beanspruchungs- und Erholungskinetik*

Ganz allgemein ausgedrückt zeigt die hohe Anzahl an wissenschaftlichen Ergebnissen, wie bereits in den vorherigen Kapiteln dargelegt leistungsphysiologische, metabolische und hormonelle Unterschiede zwischen Männern und Frauen. Diese Divergenzen haben einen direkten Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit. In verschiedenen Sportarten (Schwimmen, leichtathletischen Lauf- und Sprungdisziplinen) sind geschlechtsbedingte Leistungsunterschiede eindeutig belegbar. Die Betrachtung der geschlechtsspezifischen Leistungsdifferenzen bei den aktuellen Weltrekorden zeigt bei den Läufen von 800 m bis zum Marathon einen durchschnittlichen Unterschied von 11,6 % zwischen Männern und Frauen. Mit zunehmender Streckenlänge nimmt der Geschlechtsunterschied ab, so dass die Weltrekordzeit der Frauen im Marathon um 10,1 % langsamer ist verglichen mit den männlichen Athleten. Höhere geschlechtsbedingte Leistungsunterschiede sind bei den schnellkraftdominierten Disziplinen zu verzeichnen. Hierbei liegt die geschlechtsspezifische Gesamtdifferenz der Weltrekorde bei durchschnittlich 18,8 % (Hottenrott, 2015). Die leistungsphysiologischen, metabolischen und hormonellen Geschlechtsunterschiede führen zu einer höheren Kraft- und Schnellkraftausdauer bei den männlichen Sportlern. Weiterhin resultieren die Divergenzen in einer höheren absoluten Krafterzeugung sowie beispielsweise einer höheren maximalen Laufgeschwindigkeit bei Sprintbelastungen. Im Gegensatz dazu zeigen Frauen bei intermittierenden Belastungen eine höhere Ermüdungsresistenz im Vergleich zu männlichen Personen (Hicks et al., 2001). In einer Studie von Laurent et al. (2010) untersuchten die Wissenschaftler den geschlechtsspezifischen Einfluss auf die Regenerationskinetik bei maximalen, wiederkehrenden Sprintbelastungen. Die Autoren konnten feststellen, dass die Männer signifikant schnellere Laufzeiten in allen 30m-Sprints erzielen konnten. Weiterhin wiesen die weiblichen Probanden signifikant geringere

Blutlaktatkonzentrationen sowie eine signifikant geringere Abnahme der Laufleistung bei wiederkehrenden Sprintleistungen auf. Das weist auf eine erhöhte Ermüdungsresistenz bei Frauen gegenüber intermittierenden Belastungen hin. In einer weiteren Studie untersuchten Laurent et al. (2014) inwiefern geschlechtsspezifische Einflüsse bei einem hochintensiven Intervalltraining mit variablen Regenerationszeiten auftreten können. Dabei führten die Wissenschaftler an unterschiedlichen Tagen drei hochintensive Trainingseinheiten auf dem Laufband mit dem Probandenkollektiv durch. Die Trainingseinheiten bestanden aus sechs 4-minütigen Intervallen bei individueller maximaler Geschwindigkeit, die jeder Proband eigenständig wählen konnte. Die Pausenzeit zwischen jedem Durchgang betrug eine, zwei oder vier Minuten. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Geschlechtsdimorphismus bei dem erreichten Prozentsatz der Geschwindigkeit bei maximaler Sauerstoffaufnahme ( $vVO_{2peak}$ ) sowie der maximalen Herzfrequenz ( $\%HF_{max}$ ). Weiterhin zeigten die Resultate, dass die männlichen Probanden eine höhere  $\%vVO_{2peak}$  auswählten, während Frauen eine höhere  $\%HF_{max}$  und  $\%VO_{2peak}$  produzierten. Keine geschlechtsspezifischen Unterschiede traten bei der Laktatkonzentration und der subjektiv wahrgenommenen Beanspruchung auf. Aus den Ergebnissen schlussfolgerten die Wissenschaftler, dass Frauen eine höhere Erholungsfähigkeit nach hochintensiven Belastungen aufweisen. Weiterhin kamen sie zu der Erkenntnis, dass ein Belastungs-Pausen-Verhältnis von 2:1 für beide Geschlechter optimal erscheint. Esbjörnsson-Liljedahl et al. (1999) und Weber et al. (2006) zeigten in ihren Studien, dass Frauen die größere Fähigkeit besitzen absolute Leistungen aufrechtzuerhalten. Bei einer Relativierung der erbrachten Leistung auf das Körpergewicht oder die fettfreie Masse kam es allerdings zu einer Verringerung der geschlechtsspezifischen Unterschiede in der muskulären Ermüdung. Daher scheint der Geschlechtsdimorphismus in der Ermüdung der genannten Studienergebnisse eher mit einer höheren Leistungserbringung der Männer zu Beginn des WAnT zusammenzuhängen. Esbjörnsson-Liljedahl et al. (2002) untersuchten in einer weiteren Studie Freizeitsportler, die drei aufeinanderfolgende 30-sekündige WAnTs mit jeweils 20 Minuten Regenerationszeit durchführten. Dabei erreichten die Männer eine um 30 % höhere maximale Leistung sowie um 28 % höhere durchschnittliche Leistung gegenüber den weiblichen Sportlern. Weiterhin wiesen die Frauen eine geringere Laktatkonzentration auf. Lediglich bei den Männern wurde ein signifikanter Leistungsrückgang zwischen dem ersten und dritten WAnT festgestellt (ca. 8 %). Daraus ließ sich schließen, dass die weiblichen Probanden eine größere Fähigkeit besitzen Leistungen nach hochintensiven Belastungen wiederherzustellen, die durch ausreichend lange Regenerationszeiten getrennt sind. Gratas-Delamarche et al. (1994) untersuchten in ihrer Studie männliche und weibliche Sprinter, die einen 30-sekündigen WAnT absolvieren mussten. Dabei fanden die Forscher heraus, dass Geschlechtsunterschiede die Reaktion des metabolischen und sympathischen Nervensystems auf supramaximale Belastungen beeinflussen. Fünf Minuten nach der supramaximalen Belastung wiesen Frauen einen niedrigeren Plasma-Katecholamin- und Blutlaktatspiegel bei

ähnlicher relativer Intensität verglichen mit den Männern auf. Die Wissenschaftler vermuten, dass eine verringerte maximale Aktivierungsgeschwindigkeit der glykolytischen Energie und eine starke Abhängigkeit von der Fettoxidation zu einer Schonung des Muskelglykogens sowie einer geringeren Blutlaktatkonzentration nach der Belastung bei Frauen beitragen. Im Gegensatz dazu fanden Vincent et al. (2004) bei einer Studie mit nichttrainierten Männern und Frauen keine signifikanten Unterschiede bei den Blutlaktat- und Katecholaminspiegeln 8, 10, 20 und 30 Minuten nach einem WAnT. Lediglich die Glukosekonzentration fünf Minuten und der Insulinspiegel 10 Minuten nach dem WAnT war bei den Frauen signifikant höher. Arena et al. (2009) untersuchten die Reaktion des Herz-Kreislauf-Systems nach maximaler und supramaximaler Ausdauerbelastung. Dabei führte eine große Anzahl an männlichen und weiblichen Probanden einen Laufbandstufentest durch, wobei die Forscher die Herzfrequenzwiederherstellung ermittelten. Bei der maximalen Herzfrequenz wurde kein geschlechtsspezifischer Unterschied festgestellt. Allerdings war der Rückgang der Herzfrequenz eine beziehungsweise zwei Minuten nach der Belastungsende bei den Männern signifikant höher. De Mendonca et al. (2017) untersuchten ebenfalls die Herzfrequenzwiederherstellung nach einem Stufentest auf dem Radergometer. Dabei zeigte sich, dass die männlichen Probanden eine beziehungsweise zwei Minuten nach der maximalen Belastung einen höheren Rückgang der Herzfrequenz aufwiesen als die Frauen. Die Unterschiede waren allerdings nicht signifikant.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die morphologischen, strukturellen und hormonellen Divergenzen zu geschlechtsspezifischen Leistungsunterschieden führen. Anhand der dargestellten Studienergebnisse zeigt sich deutlich, dass Frauen im Vergleich zu Männern eine um 10 bis 15 % geringere oxidative Kapazität bei gleicher Sportart aufweisen. Zugleich sind bei submaximalen Ausdauerbelastungen bei Frauen eine höhere Herzfrequenz, eine höhere Fettoxidationsrate, ein geringerer Proteinkatabolismus sowie ein niedrigerer Kohlenhydratumsatz festzustellen. Zusätzlich führen die geringere Testosteronkonzentration sowie der höhere Östrogengehalt bei dem weiblichen Organismus zu einer verringerten Kraft- und Schnellkraftausdauer. Dies hat zur Folge, dass bei Ausdauersportarten in der Weltspitze der Leistungsunterschied zwischen Männern und Frauen durchschnittlich 10 % beträgt und im Bereich der Schnellkraftsportarten bei 15 bis 20 % liegt (Neumann, 2016; Hottenrott, 2015). Daher scheint es unabdingbar, den aufgezeigten Geschlechtsdimorphismus in die Belastungs- und Regenerationssteuerung einfließen zu lassen.

## *2.2 Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit*

Durch ein regelmäßiges Kraft- oder Ausdauertraining ist der Körper in der Lage sich an die erhöhten Anforderungen anzupassen. Ein regelmäßiges Ausdauertraining führt ganz allgemein betrachtet zu tiefgreifenden Adaptionen des

kardiorespiratorischen und neuromuskulären Systems. Aufgrund dessen kommt es zu einer verbesserten Sauerstoffzufuhr aus der Atmosphäre zu den Mitochondrien sowie einem besseren Muskelstoffwechsel. Die Anpassungen bewirken eine höhere Ausdauerleistungsfähigkeit, welche sich in einer Rechts-Verschiebung der Geschwindigkeits-Zeit-Kurve widerspiegeln. Dieser Effekt ermöglicht es dem Sportler bei einer vorgegebenen hohen Belastungsintensität länger zu trainieren oder über einen gewissen Zeitraum mit einer höheren Trainingsintensität zu arbeiten. Dabei sind vier messbare Parameter entscheidend, um den Einfluss des Trainings auf die Geschwindigkeits-Zeit-Kurve und somit auf die Ausdauerleistungsfähigkeit sichtbar zu machen. Zum einen handelt es sich dabei um die maximale Sauerstoffaufnahme, die Bewegungsökonomie, die Laktat- und ventilatorische Schwelle sowie die Kinetik der Sauerstoffaufnahme. Weitere Parameter, wie beispielsweise die Geschwindigkeit bei der  $VO_{2max}$  können helfen die Ausdauerleistungsfähigkeit zu bestimmen (Vgl. Jones & Carter, 2000). Ein anaerobes Training (Krafttraining) führt primär zu einer Steigerung der Koordination sowie zu einer erhöhten Anzahl von Aktin- und Myosinfilamenten. Die erzielten Trainingseffekte eines Kraft- oder Ausdauertrainings werden hauptsächlich bei der körperlichen Arbeit ersichtlich, allerdings sind einige Effekte auch in Ruhe sichtbar (Klinke et al., 2010).

### *2.2.1 Muskulatur*

Die Skelettmuskulatur ist ein hochgradig formbares Gewebe, welches zu metabolischen und morphologischen Anpassungen als Reaktion auf Störungen der zellulären Homöostase fähig ist, die durch Training induziert werden (Coffey & Hawley, 2007; Flück & Hoppeler, 2003). Dabei ist entscheidend, ob es sich um ein Widerstandstraining oder Ausdauertraining handelt, da beide Trainingsmethoden unterschiedliche Reaktionen innerhalb des Muskelmilieus hervorrufen (Mahoney & Tarnopolsky, 2005; Stepto et al., 2009). Somit sind die durch das Training induzierten Anpassungen der Skelettmuskulatur spezifisch hinsichtlich der Art des Trainings (Widerstands- oder Ausdauertraining) und abhängig von der Dauer, Intensität und Häufigkeit des Trainingsreizes (Hawley, 2002). Die trainingsbedingten Effekte auf die Skelettmuskulatur müssen dementsprechend differenziert für ein Widerstands- sowie Krafttraining betrachtet werden. Ein regelmäßiges Krafttraining führt beispielsweise zu einer erhöhten Muskelaktivierung und Muskelfaserhypertrophie, was wiederum in einer Erhöhung der maximalen kontraktile Kraft mündet (Folland & Williams, 2007). Verglichen mit dem Krafttraining ist ein Ausdauertraining durch geringere Intensitäten und eine längere Dauer gekennzeichnet, was die aktiven Muskelfasern deutlich weniger mechanisch belastet (Baar, 2009). Dies führt zu Störungen der intrazellulären Konzentrationen von Calcium, Sauerstoff, Laktat und der reaktiven Sauerstoffspezies sowie zu erhöhten AMP:ATP- und  $NAD^+ : NADH$ -Verhältnissen (Coffey & Hawley, 2007). Aufgrund dessen kommt es zu einer Reihe

von intrazellulären Signalkaskaden, um die mitochondriale Biogenese zu fördern (Pilegaard et al., 2003; Wu et al., 2002). Neben der mitochondrialen Dichte bewirkt ein Ausdauertraining eine Erhöhung der oxidativen Kapazität der trainierten Muskelfasern (Holloszy, 1967) und gleichzeitig wird die Veränderung im Substratstoffwechsel (Holloszy & Coyle, 1984) gefördert, was wiederum zu einer Steigerung der aeroben Ganzkörperkapazität ( $VO_{2max}$ ) führt (Hawley, 2002). Ebenfalls beeinflusst ein Ausdauertraining die Muskelmorphologie und führt somit zu einer Muskelhypertrophie und Wachstum. Hierbei kommt es zu einer Verdickung bestehender Muskelzellen, welche durch die Neubildung von kontraktilen Elementen erreicht wird. Ein 12-wöchiges aerobes Training auf dem Fahrradergometer führte unter anderem zu einer signifikanten Volumenvergrößerung des musculus quadriceps ( $12 \pm 2 \%$ ), sowie einer Kraftsteigerung des Knieextensors ( $55 \pm 7 \%$ ) (Harber et al., 2009). Diese Zunahme des Muskelvolumens und der Krafterzeugung ist mit einem Krafttraining über den gleichen Zeitraum zu vergleichen (Trappe et al., 2011). Weiterhin konnten Harber et al. (2009) zeigen, dass durch ein regelmäßiges aerobe Ausdauertraining die Typ-I-Muskelfasergröße gesteigert werden kann, währenddessen die Typ-IIa-Muskelfasern in der Größe unverändert bleiben. Die Ergebnisse führten zu der Annahme, dass ein aerobes Ausdauertraining die Muskelfunktion durch den Umbau der kontraktilen Eigenschaften auf Muskelfaserebene verbessert sowie zu einer Muskelhypertrophie führt. Da diese Effekte auch im höheren Alter zu verzeichnen sind, bietet das aerobe Ausdauertraining eine mögliche Trainingsmethode, um einer Sarkopenie entgegenzuwirken. Weiterhin führt eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit zu einer stärkeren Kapillarisation innerhalb der Muskulatur sowie zu einer Erhöhung der Mitochondriendichte und Zunahme des Mitochondrienvolumens. Dabei stellt die Biogenese zusätzlicher Mitochondrien die zentrale Adaption auf ein regelmäßiges Ausdauertraining dar. Die lokalen Anpassungen in der Skelettmuskulatur, wie eine erhöhte mitochondriale Biogenese und Kapillardichte helfen dem Organismus Sauerstoff zu transportieren und zu nutzen. Aufgrund dessen kann Energie erzeugt werden und die Muskelermüdung bei langanhaltenden Ausdauerbelastungen hinausgezögert werden (Joyner & Coyle, 2008). Das Mitochondrienvolumen der Skelettmuskulatur steht dabei in einem engen Zusammenhang mit der maximalen Sauerstoffaufnahme und mit der mechanischen Leistung im Dauerleistungsbereich (Hoppeler, 2018). Die Größe der Mitochondrien kann durch Ausdauertraining um das Zwei- bis Dreifache gesteigert werden, was zu einer höheren Leistungsfähigkeit der Muskelzelle führt (Astrand, 1993). Das dichtere Kapillarnetz führt zu einer Mehrdurchblutung des Muskels und damit zu einer besseren Sauerstoffaufnahme. Ebenfalls nimmt die aerobe sowie anaerobe Enzymaktivität durch ein Ausdauertraining zu und es kommt zu einer Zunahme der intramuskulären Glykogendepots. Dadurch können die vorhandenen Zellenergien effektiver genutzt werden. Die Enzyme zur schnellen Energiegewinnung (glykolytische Enzyme und Kreatinkinase) bei hochintensiven Belastungen nehmen dagegen ab (Henriksson, 1993). Dies ermöglicht dem Sportler eine frühere



Mobilisierung der Fette, was den Kohlenhydratanteil bei der Energiebereitstellung senkt und die Glykogenspeicher schont (Astrand, 1993). Diese trainingsbedingten Adaptionen führen zu einer Steigerung der muskulären Leistungsfähigkeit sowie zu einer Verminderung des peripheren sympathischen Antriebs auf das Herz. Neben der Veränderung der Sauerstoffzufuhr, des Substratstoffwechsels sowie der Mitochondrienmasse im Skelettmuskel durch Ausdauertraining führen weitere Faktoren zu einer verbesserten Leistungsfähigkeit sowie Lauf- bzw. Radökonomie (Chapman et al., 2008; Saunders et al., 2004). Einer dieser Faktoren ist eine neuronale Anpassung in der Skelettmuskulatur. Zwischen hochtrainierten Sportlern und Anfängern gibt es starke Variationen in den Muskelrekrutierungsmustern (Chapman et al., 2008). Hochtrainierte Sportler besitzen die Fähigkeit eine höhere Muskelkoaktivierung, eine höhere Muskelsteifigkeit sowie eine stärkere exzentrische und konzentrische Muskelaktivität zu erbringen. Dies ermöglicht eine effizientere Nutzung der gespeicherten Energie (Heise et al., 2008). Die Auswirkungen eines regelmäßigen Krafttrainings auf die Muskulatur sollen im Folgenden nur kurz erwähnt werden. Hierbei kommt es zu einer Muskelhypertrophie der Typ-II-Muskelfasern sowie einer neuronalen und energetischen Adaptation. Durch die neuronale Adaptation besteht die Möglichkeit einer besseren Rekrutierung von mehr motorischen Einheiten. Durch die energetische Adaptation ist die Enzymaktivität des anaeroben Stoffwechsels verbessert (Marées & Heck, 2006).

### *2.2.2 Laktatbildung und Laktatabbau*

Zwischen der Belastungsintensität und dem Anstieg der Laktatkonzentration oberhalb der Laktatschwelle sowie den dazugehörigen Änderungen im Gasaustausch besteht ein enger Zusammenhang. Dabei stellen die Laktatschwelle und die ventilatorische Schwelle wichtige Parameter zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit dar (Coyle et al., 1991; Jones & Doust, 1998). Weiterhin ist der prozentuale Anteil der  $VO_{2max}$ , der während einer Leistungseinheit aufrechterhalten werden kann, mit dem Grad der Blutlaktatakkumulation während der Belastung verbunden (Tanaka & Seals, 2008). Um die Beziehung zwischen Blutlaktatkonzentration und Anteil an der  $VO_{2max}$  auszudrücken, sind unterschiedliche Methoden entwickelt worden (Bentley et al., 2007; Faude et al., 2009). Die Laktatschwelle, welche eine Schätzung eines Haltepunktes auf der Laktatkurve als Funktion der Trainingsintensität beschreibt, hat sich diesbezüglich als gängiger Begriff manifestiert (Tokmakidis et al., 1998). Die Auswirkungen eines Ausdauertrainingsprogramms führen dabei zu einer Rechts-Verschiebung sowohl der Laktatschwelle als auch der ventilatorischen Schwelle und das führt zu einer verbesserten Leistungsabgabe/Geschwindigkeit an der jeweiligen Schwelle (Pate & Branch, 1992; Tokmakidis et al., 1998). Diese trainingsbedingte Anpassung ermöglicht es dem ausdauertrainierten Sportler theoretisch eine höhere absolute Leistung oder Laufgeschwindigkeit sowie eine höhere relative Belastungsintensität

(%  $VO_{2max}$ ) ohne nachhaltige Bildung von Laktat während einer längeren Belastung aufrechtzuerhalten (Rønnestad & Mujika, 2014). Eine Vielzahl an wissenschaftlichen Studien belegen dabei sowohl beim Laufen als auch beim Radfahren die Beziehung zwischen Langzeitleistung und der Geschwindigkeit beziehungsweise der Leistungsabgabe an der Laktatschwelle (Impellizzeri et al., 2005; Slattery et al., 2006). Weiterhin ist die Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit mit einer Verringerung der Laktatkonzentration bei submaximaler und maximaler Belastung verbunden (Vgl. Jones & Carter, 2000). Das führt wiederum dazu, dass ausdauertrainierte Sportler an der individuellen anaeroben Schwelle eine höhere Leistung oder Laufgeschwindigkeit erbringen können (Carter et al., 1999; Weltman et al., 1992). Bereits kurzzeitige Ausdauertrainingsprogramme von sechs bis acht Wochen konnten Verbesserungen von 4 bis 8 % am maximalen Laktat-Steady-State hervorrufen (Leistung oder Sauerstoffaufnahme). Diese Effekte konnten sowohl bei gut ausdauertrainierten Alterklassensportlern (Billat et al., 2004) als auch mäßig trainierten Läufern (Philp et al., 2008) festgestellt werden. Eine Studie von MacRae et al. (1992) hat gezeigt, dass die geringeren Blutlaktatkonzentrationen bei Trainierten hauptsächlich mit einer besseren Verwertung des Blutlaktats zusammenhängt und nicht durch eine verringerte Laktatproduktion bedingt wird. Ein Ausdauer Spitzenathlet ist in der Lage bei 80 % und mehr der maximalen Sauerstoffaufnahme noch aerob Energie zu gewinnen und somit die hohen Belastungsintensitäten lang aufrechtzuerhalten. Eine untrainierte Person erreicht dahingegen bereits bei ca. 50 % der  $VO_{2max}$  den anaeroben Bereich und kann aufgrund des Sauerstoffdefizites und der damit verbundenen Laktatakkumulation die Belastung nicht über einen längeren Zeitraum erbringen (Williams, 1997). Folglich kann ein Spitzenathlet bei einem höheren Prozentsatz der  $VO_{2max}$  ein höheres Tempo über einen längeren Zeitraum halten. Eine Belastung oberhalb der anaeroben Schwelle führt zu einem exponentiellen Anstieg der Laktatkonzentration und somit zu einer schnelleren Ermüdung, welche durch die Auswirkung der metabolischen Azidose oder die beschleunigte Entleerung der Muskelglykogendepots eintritt (Boyd et al., 1974; Sahlin, 1992). Bei maximalen Belastungen kommt es durch ein Ausdauertraining (Demarle et al., 2001) oder ein hochintensives Training (Jones et al., 2003) zu einer beschleunigten  $VO_2$ -Kinetik, welche das anfängliche Sauerstoffdefizit und die Laktatproduktion reduziert. Dadurch kommt es zu einer Schonung der anaeroben Substrate und die Belastungsdauer kann verlängert werden (Caputo & Denadai, 2004). Messonnier et al. (2006) konnten in ihrer Studie ebenfalls zeigen, dass ein mehrwöchiges Ausdauertraining auf dem Radergometer zu einer langsameren Blutlaktatakkumulation bei intensiven Belastungen führt. Die verringerte Blutlaktatkonzentration deutet auf eine geringere Störung der Homöostase des Organismus hin, was in der Konsequenz eine längere Belastungsdauer vor der eintretenden Ermüdung zulässt (Messonnier et al., 2006). Zusätzlich wirkt sich der Ausdauertrainingszustand ebenfalls auf die Laktat-Oxidationskapazität aus. Ausdauertrainierte Sportler weisen durch ausdauertrainingsinduzierte Anpassungen im Skelettmuskel eine höhere Laktat-

Clearance aus dem Organismus auf (Bergman et al., 1999). Auf Grundlage dessen, dass das oxidative Enzymsystem von trainierten Personen gesteigert ist, bilden Ausdauersportler weniger Laktat. Gleichzeitig wird weniger Glykogen verbraucht (Schek, 1997). Messonnier et al. (2006) vermuten, dass es zu einer Abnahme der Muskel-Laktatdehydrogenase (Muskel-LDH) und der Muskel-LDH-Aktivitäten kommen könnte, was zu einer verringerten Laktatproduktion in den trainierenden Muskeln führt. Weiterhin nehmen die Autoren an, dass die Abnahme des Phosphofruktokinase/Citratsynthase-Verhältnisses auch auf ein geringeres Ungleichgewicht zwischen der Rate der Glykolyse und der Rate der Pyruvatverwertung im Zitratzyklus hinweisen könnte. Diese Anpassungen würden zusammengenommen eher die Pyruvat-Oxidation als die Pyruvat-Reduktion begünstigen, was zu einer geringeren Laktatproduktion bei Sportlern mit verbesserter Ausdauerleistungsfähigkeit führt. Zudem verfügt ein trainierter Sportler über eine verbesserte Bewegungsökonomie, was einen effizienteren Muskeleinsatz zur Folge hat. Daher muss der Sportler erst bei höheren Belastungsintensitäten vermehrt Typ-II-Muskelfasern einsetzen, welche durch eine höhere Laktatproduktion und stärkere Ermüdung gekennzeichnet sind (Kirsch, 1994; Williams, 1997). Nicht nur die Laktatbildung und der Laktatabbau sind für die sportliche Leistungsfähigkeit von Bedeutung. Einen wesentlichen Einfluss hat auch der Laktattransport, wobei der Monocarboxylat-Transporter (MCT) eine wichtige Rolle zukommen. Die Regulation der Muskellaktatkonzentrationen und damit auch der Blutlaktatkonzentrationen hängen dabei nicht nur von der Glykolyserate ab, sondern auch von der Effizienz des Laktattransports mittels MCT (Bonen, 2000). Juel (2008) fand heraus, dass vor allem bei Kurzzeitbelastungen die Leistungsfähigkeit des Transporters den leistungslimitierenden Faktor darstellt. Die MCTs sind dabei zum einen bei dem Laktattransport als Energieträger als auch bei der pH-Regulation beteiligt. In der Skelettmuskulatur kommen sowohl die Isoformen MCT1 und MCT4 vor. Dabei befindet sich der MCT1 überwiegend in den oxidativen Muskelfasern und ist für die Laktataufnahme verantwortlich. Der MCT4 ist hauptsächlich in den glykolytischen Muskelfasern zu finden und ist für die Laktatabgabe zuständig (Bonen, 2000). Bonen et al. (2000) konnten in Untersuchungen einen großen Zusammenhang zwischen der MCT1-Dichte und der Laktatelimination und der Blutlaktatkonzentration nach supramaximaler Belastung nachweisen. Grundsätzlich weisen Personen mit einer höheren  $VO_{2max}$  und einer damit verbundenen besseren Ausdauerleistungsfähigkeit einen signifikant höheren Gehalt an MCT1 und MCT4 in der Skelettmuskulatur auf (Thomas et al., 2005). Somit lässt sich durch Ausdauertraining die Transportleistungsfähigkeit von MCT1 und MCT4 erhöhen und dies führt zu einer verbesserten pH-Regulation (Pufferkapazität) des entsprechenden Gewebes (Juel, 2008). Die durchschnittliche Halbwertszeit der Laktatelimination befindet sich bei ungefähr 15 Minuten. Allerdings hängt die Geschwindigkeit des Laktatabbaus von der maximalen Laktatkonzentration ab. Dabei bezieht sich die Halbwertszeit von 15 Minuten auf Laktatkonzentrationen von 10 mmol/l. Bei einem Laktatwert von 5 mmol/l liegt sie bei 10 Minuten und bei Werten über 20 mmol/l sind Halbwertszeiten von über

25 Minuten möglich. Die Laktateliminationsrate kann durch eine aktive Erholung, bei einer Belastungsintensität von 40 bis 50 % der  $VO_{2max}$  deutlich erhöht werden. Die Halbwertszeit kann somit um das 3-fache verkürzt werden (Heck, 2006).

### 2.2.3 Herz-Kreislauf-System

Eine Anpassung des Herz-Kreislauf-Systems wird hauptsächlich durch ausdauerorientierte Sportarten beziehungsweise Bewegungsformen erzielt. Durch ein regelmäßiges Training kommt es bereits im Anfangsstadium zu einer funktionellen Adaptation des Herz-Kreislauf-Systems, jedoch zunächst zu keiner Vergrößerung der Organe. Diese kardialen Veränderungen beinhalten unter anderem eine Verbesserung des Muskelstoffwechsels und eine Verringerung der Herzfrequenz. Erst ein Ausdauertraining mit leistungssportlichen Umfängen führt, im späteren Verlauf auch zu dimensional Anpassungen des Herz-Kreislauf-Systems. Dabei bestimmen die Dauer, die Intensität und die Art der körperlichen Belastung die kardialen Adaptationen (Kindermann et al., 2007). Infolge eines leistungssportlichen Ausdauertrainings kann es zu einer vergrößerten anatomischen Kapazität des Herzens kommen. Bei Überschreitung einer individuellen Grenze an Trainingsintensität und -umfang können sich strukturelle Adaptationen ausbilden und es kann sich ein sogenanntes Sportherz entwickeln (Scharhag et al., 2013). Allerdings spielt auch die Genetik eine wesentliche Rolle bei der Ausbildung eines Sportherzens (Kindermann & Scharhag, 2014). Ein hauptsächlich kraftbetontes Training führt im Normalfall zu keiner Verdickung der Kammerwände. Bei der Ausbildung eines Sportherzens kommt es zu einer Vergrößerung des relativen Herzvolumens. Bei Normalpersonen liegt das relative Herzvolumen bei 10 bis 12 ml/kg (Männer) beziehungsweise bei 9 bis 11 ml/kg (Frauen). Bei Sportherzen können dahingegen die relativen Herzvolumina 19 bzw. 20 ml/kg betragen. Die größten Sportherzen weisen dabei Langstreckenläufer, Triathleten, Straßenradrennfahrer und Ski-Langläufer auf (Kindermann & Scharhag, 2014). Daraus resultiert beispielsweise eine deutliche Zunahme des Schlagvolumens in Ruhe und unter Belastung, welches durch die Dilatation des Herzens und der Hypertrophie der Wandmuskulatur erreicht wird. Zusätzlich führt das Training zu einer Erhöhung der Herzgröße und des Herzgewichtes. Aufgrund des vergrößerten Schlagvolumens ist die Herzfrequenz in Ruhe und unter submaximaler Belastung erniedrigt. Die maximale Herzfrequenz verändert sich dahingegen nicht oder verringert sich nur minimal. Das Herzminutenvolumen wird unter Belastung sowohl über eine Steigerung der Herzfrequenz sowie über die Vergrößerung des Schlagvolumens erhöht. Entsprechend steigt das Herzminutenvolumen bei Untrainierten um das 4-fache und bei Ausdauertrainierten um das 6-fache (Gekle et al., 2015). Das maximale Herzzeitvolumen kann im Einzelfall doppelt so hoch sein, wie bei einem Untrainierten. Das Schlagvolumen nimmt dabei relativ gesehen nur geringfügig zu (s. Tab. 4). Das Herzzeitvolumen bei submaximalen Belastungen und

die arterio-venöse Sauerstoffdifferenz verhalten sich ähnlich wie bei gesunden Normalpersonen (Kindermann & Scharhag, 2014). Unter arterio-venöser Sauerstoffdifferenz wird die Differenz im Sauerstoffgehalt des Blutes in der Lungenarterie und im arteriellen Blut verstanden. Sie gibt dabei einen Hinweis auf die periphere Sauerstoffausschöpfung. Eine Vergrößerung der arterio-venösen Sauerstoffdifferenz führt zu einer erhöhten Sauerstoffmehraufnahme in den Lungen. In Ruhe beträgt die arterio-venöse O<sub>2</sub>-Differenz im Skelettmuskel etwa 5 Vol.-%. Bei maximaler Belastung erreichen hochausdauertrainierte Sportler Werte von 16 bis 18 Vol.-%, wohingegen die arterio-venöse O<sub>2</sub>-Differenz bei Untrainierten bei 10 bis 12 Vol.-% liegt (Reindell et al., 2009). Weiterhin kommt es durch eine trainingsbedingte Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit zu einer Senkung des Blutdruckes und zu einer Steigerung des Plasmavolumens. Ausdauertrainierte Personen weisen dabei durchschnittlich 40 %, in Extremfällen sogar 60 % höhere Plasmavolumina auf als Untrainierte. Durch die Erhöhung des Plasmavolumens kommt es zu einer verbesserten Thermoregulation sowie zu einer Initiierung eines generell höheren Blutvolumens (Klinke et al., 2010).

Tab. 4. Unterschiede zwischen Untrainierten und Sportlern in Ruhe und unter Belastung (Gekle et al., 2015)

	In Ruhe		Unter Belastung	
	Untrainierter	Sportler	Untrainierter	Sportler
Herzminutenvolumen (l/min)	5	5	20	30
Schlagvolumen (ml)	70	105	110	160
Herzfrequenz (S/min)	70	40	195	195
Herzgewicht (g)	300	500	300	500
Blutvolumen (l)	5	6	5	6
Atemminutenvolumen (l/min)	7	7	120	bis zu 200
O <sub>2</sub> -Aufnahme (l/min)	0,3	0,3	3	6
Laktat (mmol/l)	1	1	10	20
Körpertemperatur (°C)	37	37	40	40

Anmerkung: Herzgewicht und Blutvolumen verändern sich unter akuter Belastung nicht, sondern nur im Rahmen von regelmäßigem Training

Eine weitere Folge eines regelmäßigen Ausdauertrainings ist die Zunahme der Erythrozytenmenge. Bereits eine vierwöchige Trainingsperiode führt zu einem 5 bis 10-prozentigen Anstieg der Erythrozytenmenge. Verschiedene Querschnittsstudien haben dabei gezeigt, dass gut ausdauertrainierte Sportler aus dem Skilanglauf, Radsport oder der Leichtathletik durchschnittlich 35 % mehr rote Blutzellen besitzen als untrainierte Personen, wohingegen der Hämatokrit kaum beeinflusst wird (Schmidt, 1999). Spitzensportler aus den genannten Sportarten weisen auch ohne Höhenttraining bis zu 55 % höhere Erythrozytenvolumina auf. Das Lebensalter der Erythrozyten ist dabei bei Ausdauersportlern von 120 Tage auf bis zu 70 Tage reduziert, was zu einer verbesserten O<sub>2</sub>-Transporteigenschaft führt (Heinicke et al., 2001). Die Vermehrung des Plasmas sowie der Erythrozyten durch regelmäßiges

Ausdauertraining führt ebenso zu einer Erhöhung des Blutvolumens. Somit besitzen gut ausdauertrainierte Sportler 40 %, teilweise sogar 60 % mehr Blut als untrainierte Personen. Bei Ausdauertraining unter NN-Bedingungen verbessert sich die Ausdauerleistungsfähigkeit proportional mit der Erhöhung des Blutvolumens. Das führt dazu, dass Ausdauertrainierte ein erhöhtes Herzminutenvolumen und damit eine verbesserte Muskeldurchblutung aufweisen. Das Herzminutenvolumen ist bei maximaler Herzfrequenz doppelt so hoch, was wiederum zu einer verdoppelten Leistungsfähigkeit führt. Ebenfalls weisen gut ausdauertrainierte Sportler im Vergleich zu Untrainierten sowohl in Ruhe als auch unter submaximalen Belastungen ein gleiches Herzminutenvolumen bei gleichzeitig deutlich niedrigerer Herzfrequenz auf. Dieser Mechanismus führt zu einer Ökonomisierung des Herz-Kreislauf-Systems. Weiterhin führt das Sporthertz zu einer verbesserten Durchblutung des Myokards, was eine längere Diastole nach sich zieht und zu einer verbesserten Sauerstoffversorgung des Herzens führt. Somit stellt hauptsächlich das höhere Blutvolumen bei Ausdauersportlern die Ursache für die höhere Leistungsfähigkeit gegenüber untrainierten Personen dar. Vor allem bei sehr warmen äußeren Bedingungen macht sich dieser Effekt bemerkbar, wo hohe Anforderungen an die Thermoregulation gestellt werden (Schmidt, 1999).

#### *2.2.4 Ventilation*

Ein regelmäßiges Ausdauertraining führt langfristig zu funktionellen und morphologischen Anpassungserscheinungen des Atmungssystems. Ein guter Ausdauertrainingszustand geht mit einer Ökonomisierung der Atmung im Ruhezustand einher. Ähnlich wie bei der Herzarbeit, wo eine Erhöhung des Schlagvolumens mit einer Senkung der Ruhe-Herzfrequenz zusammenhängt, wird bei einer trainierten Person die Atemfrequenz gesenkt bei gleichzeitiger Steigerung des Atemzugvolumens. Die Steigerung der Volumenarbeit ist dabei ökonomischer als die Erhöhung der Frequenzarbeit. Zu Beginn einer Belastung kommt es bei ausdauertrainierten Personen zu einer optimierten Atmungsregulation, aufgrund dessen der Sportler sich schneller auf die Erfordernisse der körperlichen Aktivität einstellen kann und atmungsbedingte Störfaktoren, wie Seitenstechen vermeidet. Die verbesserte Atmungsregulation geht mit einer optimierten Blutumverteilung des Herz-Kreislauf-Systems einher. Bei submaximalen Belastungen steigt bei ausdauertrainierten Personen die Ventilationsleistung mehr durch eine Erhöhung des Atemzugvolumens als durch eine Zunahme der Atemfrequenz. Bei höheren Belastungen bzw. bei Ausbelastung kommt dann der Erhöhung der Atemfrequenz eine große Bedeutung zu. Im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit nimmt das Atemzugvolumen sogar ab (Hollmann, 1977). Grundsätzlich können Spitzensportler mehr Luft ein- und wieder ausatmen. Der Atemgrenzwert liegt dabei bei ca. 250 l bei einer Atemfrequenz von 60/min und einem Atemzugvolumen von 4,2 l. Zu den morphologischen Anpassungsmechanismen durch ein regelmäßiges

Ausdauertraining gehört die Ausbildung einer sogenannten Leistungslunge. Dabei vergrößert sich die Alveolarfläche, bei gleichzeitig konstant bleibender Alveolanzahl. Weiterhin führt das Training zu einer vermehrten Kapillarisation der Alveolen sowie zur Hypertrophie der Atemmuskulatur, wie dem Zwerchfell und den Zwischenrippenmuskeln.

Die maximale Sauerstoffaufnahme spiegelt die individuelle maximale Rate des aeroben Energieverbrauchs wieder und steht seit Langem in einem engen Zusammenhang mit der Ausdauerleistungsfähigkeit und dem Erfolg im Ausdauersport (Saltin & Astrand, 1967). Dieser Parameter stellt das zuverlässigste Bruttokriterium zur Beurteilung der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit dar. Die höchsten maximalen Sauerstoffaufnahmen werden in der Regel in den Sportarten Radsport, Skilanglauf und Rudersport erreicht, da hier eine dynamische Beanspruchung großer Muskelgruppen über einen längeren Zeitraum erfolgt (Vgl. Hollmann, 1977). Bei diesen sogenannten Ganzkörperbewegungen besteht der limitierende Faktor der  $VO_{2max}$  nicht in der Fähigkeit des Muskels den vorhandenen Sauerstoff aus dem Blut aufzunehmen, sondern in der Geschwindigkeit mit welcher der Sauerstoff dem Muskel zugeführt werden kann (Saltin & Strange, 1992). Daher scheint ein enger Zusammenhang mit dem maximalen Herzzeitvolumen zu bestehen. Die bei Spitzensportlern in der Regel sehr hohen  $VO_{2max}$ -Werte sowie maximalen Herzzeitvolumina hängen wiederum mit einem hohen Schlagvolumen bei maximaler Herzfrequenz zusammen, wohingegen sich diese von sitzenden Personen kaum unterscheidet (Spina et al., 1992). In welcher Höhe sich die maximale Sauerstoffaufnahme durch ein Ausdauertraining verbessert hängt von vielen Faktoren, wie zum Beispiel dem Ausgangsfitnesszustand, der Dauer des Trainingsprogramms oder der Belastungsnormative der einzelnen Trainingseinheiten ab (Wenger & Bell, 1986). In mehreren Studien erzielten bereits kurze Interventionsprogramme eine deutliche Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme. So konnten Carter et al. (1999) in ihren Untersuchungen aufzeigen, dass ein sechswöchiges Ausdauertraining, von wöchentlich drei bis fünf Einheiten mit jeweils 20 bis 30 Minuten die maximale Sauerstoffaufnahme durchschnittlich um 10 % steigert. Weitere Studien konnten ebenfalls positive Effekte eines kurz angelegten Ausdauertrainings auf die  $VO_{2max}$  zwischen 5 und 10 % feststellen (Billat et al., 1999; Mier et al., 1997). Hickson et al. (1981) konnten in ihren Untersuchungen über einen Trainingszeitraum von neun Wochen sogar eine durchschnittliche Steigerung der  $VO_{2max}$  von 23 % bei den Probanden nachweisen. Inwiefern sich die maximalen Sauerstoffaufnahmen bei untrainierten Personen und ausdauertrainierten Sportlern unterscheiden, konnten Ogawa et al. (1992) in einer wissenschaftlichen Studie zeigen. In der Untersuchung wiesen junge trainierte Männer eine um 38 % höhere  $VO_{2max}$  auf als die jungen untrainierten Männer. Ähnlich verhielt sich der Unterschied bei dem Vergleich der jungen trainierten Frauen mit den jungen Untrainierten. In diesem Probandenkollektiv kam eine Differenz von 41 % der  $VO_{2max}$  zustande. Bei der Betrachtung der maximalen Sauerstoffaufnahmen der älteren Probanden konnten noch größere Unterschiede zwischen

ausdauertrainierten Personen und Untrainierten festgestellt werden. Hierbei wiesen die Männer einen Unterschied von 75 % auf und die trainierten Frauen erreichten im Mittel eine 50 % höhere maximale Sauerstoffaufnahme. Durch eine Normalisierung der Ergebnisse auf die fettfreie Masse konnten die Unterschiede der  $VO_{2max}$  in den Probandengruppen um fast ein Drittel reduziert werden, allerdings wiesen sie immer noch hochsignifikante Differenzen auf. Weiterhin konnten Studien zeigen, dass die  $VO_{2max}$  eng mit der maximal erreichten Geschwindigkeit bei einem Laufbandstufentest sowie mit der maximalen Leistung bei einem Stufentest auf dem Radergometer zusammenhängt (Hawley & Noakes, 1992; Noakes et al., 1990). Allerdings wird die maximale Geschwindigkeit/Leistung nicht nur durch die  $VO_{2max}$  und die Bewegungsökonomie beeinflusst, sondern ebenfalls durch die anaerobe Kapazität, die Muskelkraft und die neuromuskulären Fähigkeiten (Jones & Carter, 2000).

### *2.2.5 Beanspruchungs- und Erholungskinetik*

Bereits in früheren Untersuchungen erforschten Darr et al. (1988) die Herzfrequenzwiederherstellung von jungen trainierten ( $24 \pm 2$  Jahre,  $VO_{2max}$   $63 \pm 3$  ml/min/kg), jungen untrainierten ( $25 \pm 3$  Jahre,  $VO_{2max}$   $44 \pm 2$  ml/min/kg), alten trainierten ( $51 \pm 2$  Jahre,  $VO_{2max}$   $57 \pm 3$  ml/min/kg) und untrainierten alten Sportlern ( $57 \pm 4$  Jahre,  $VO_{2max}$   $36 \pm 4$  ml/min/kg), unter Einbeziehung der körperlichen Fitness und der Arbeitsintensität. Die Probanden wurden nach Alter und Fitnessniveau in vier Gruppen unterteilt. Die Grundlage für die Klassifizierung stellte die maximale Sauerstoffaufnahme in ml/min/kg dar. Anschließend führten die Sportler einen Stufentest auf dem Radergometer durch. Dabei fand eine kontinuierliche Aufzeichnung der Herzfrequenz während und nach dem Test statt. Die Regressionsanalyse der schnellen (15 bis 120 s nach Abbruch der Belastung) sowie der langsamen Herzfrequenzerholungsphase (120 bis 240 s nach Abbruch der Belastung) zeigte keinen Effekt des Alters auf die Herzfrequenzwiederherstellung. Allerdings wiesen gut trainierte Probanden, unabhängig von ihrem Alter eine schnellere Erholung der Herzfrequenz auf als nicht trainierte Personen. In der Phase der ersten 15 bis 120 s nach Abbruch der Belastung waren diese Unterschiede besonders deutlich. Die Herzfrequenzwiederherstellung ist bei den trainierten Sportlern im Mittel etwa 6 Schläge schneller erfolgt als bei den untrainierten Personen. In einer Studie von Short & Sedlock (1997) wurde untersucht wie schnell sich die Sauerstoffaufnahme sowie die Herzfrequenz nach einer standardisierten Belastung auf dem Radergometer in Bezug auf die Ausdauerleistungsfähigkeit normalisiert. Dabei absolvierten 12 trainierte Probanden ( $VO_{2peak}$   $53,3 \pm 6,4$  ml/min/kg) und 10 untrainierte Personen ( $VO_{2peak}$   $37,4 \pm 3,2$  ml/min/kg) an unterschiedlichen Tagen zwei 30-minütige Radergometertests bei 70 % der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $W70\%$ ) beziehungsweise bei  $1,5$  l/min  $VO_2$  ( $W1,5$ ). Nach Beendigung der Belastung erfolgte anschließend eine passive Erholungsphase



mit einer kontinuierlichen Aufzeichnung der Ventilation sowie der Herzfrequenz. Die Dauer der Regeneration betrug entweder maximal 60 Minuten oder bis die Sauerstoffaufnahme den Ruhewert erreicht hatte. Die Ergebnisse zeigten, dass die Trainierten im Vergleich zu den untrainierten Personen unter beiden Testbedingungen eine signifikant kürzere Zeit benötigten, um das Ausgangsniveau der Sauerstoffaufnahme in Ruhe zu erreichen ( $W70\%$ :  $40,3 \pm 14,8$  vs.  $50,2 \pm 14,0$  min;  $W1,5$ :  $21,0 \pm 9,3$  vs.  $39,1 \pm 14,2$  min). Unter den Testbedingungen bei 70 % der maximalen Sauerstoffaufnahme verhielt sich die Erholung der Herzfrequenz zwischen beiden Gruppen nahezu identisch. Die Erholungsherzfrequenzen nach der Testdurchführung bei einer  $VO_2$  von 1,5 l/min waren über den kompletten 60-minütigen Messzeitraum bei den Trainierten geringer als bei den untrainierten Probanden. Anhand der Ergebnisse schlussfolgerten die Autoren, dass trainierte Personen eine schnellere Regulierung des Nachbelastungsstoffwechsels bei gleicher absoluter oder relativer Arbeitsleistung aufweisen. Silverman & Mazzeo (1996) untersuchten die neuroendokrinen Anpassungsmechanismen an maximale und submaximale Belastungen bei Männern in Abhängigkeit von Alter und Trainingsstatus. Insgesamt wurden 24 trainierte Radfahrer und 23 sitzende Männer jeweils in eine junge Altersgruppe (22,9 Jahre), mittlere Altersgruppe (44,9 Jahre) und alte Altersgruppe (65,5 Jahre) eingeteilt. Die Probanden führten einen Ausbelastungsstufentest sowie einen 45-minütigen submaximalen Test an ihrer individuellen Laktatschwelle auf dem Radergometer durch. Die Konzentrationen von Plasma-Laktat, Glukose, Wachstumshormonen, Cortisol, Noradrenalin und Adrenalin sind in Ruhe und während der Testdurchführung untersucht worden. Anhand des Probandenkollektives zeigte sich, dass die trainierten Personen in allen Altersgruppen ein geringeres Körpergewicht, einen geringeren Körperfettanteil, einen niedrigeren systolischen und diastolischen Blutdruck sowie eine höhere maximale Herzfrequenz aufgewiesen haben. Der maximale Sauerstoffverbrauch ( $VO_{2peak}$ ) nahm mit zunehmendem Alter ab. Die trainierten Probanden wiesen, unabhängig vom Alter einen höheren maximalen absoluten und relativen Sauerstoffverbrauch auf als die sitzenden Personen. Die Sauerstoffaufnahme an der Laktatschwelle war bei allen trainierten Probanden, unabhängig vom Alter höher als bei den Untrainierten. Bei der Einbeziehung des Prozentwertes der  $VO_{2max}$  an der Laktatschwelle konnte sowohl bei den jungen als auch den Probanden mittleren Alters Trainingseffekte im Vergleich zu den sitzenden Personen festgestellt werden. Die trainierten Sportler wiesen einen höheren Prozentwert der  $VO_{2max}$  an der Laktatschwelle auf. In der Gruppe der alten Probanden konnte kein Unterschied festgestellt werden. In Ruhe wiesen alle trainierten Probanden, unabhängig vom Alter ein höheres Cortisollevel auf im Vergleich zu den untrainierten Personen. Innerhalb des Ausbelastungstests erreichten die trainierten Probanden in allen Altersgruppen signifikant höhere Arbeitsleistungen, Laktatkonzentrationen und Wachstumshormonkonzentrationen als die sitzenden Personen. Eine signifikant höhere Cortisolkonzentration konnte nur bei jungen Sportlern und Probanden mittleren Alters, verglichen mit den sitzenden Personen der gleichen Altersgruppe

festgestellt werden. Ähnliche Ergebnisse wurden bei der 45-minütigen submaximalen Belastung ermittelt. Die trainierten Probanden wiesen in allen Altersklassen eine signifikant höhere Arbeitsleistung, eine geringere durchschnittliche Laktatkonzentrationen, eine höhere Adrenalin- und Noradrenalin-Konzentration sowie ein höheres Cortisollevel während des submaximalen Tests im Vergleich zu den untrainierten Personen auf. Bei dem respiratorischen Quotienten erzielten die trainierten jungen Probanden sowie die trainierten Sportler mittleren Alters einen signifikanten Trainingseffekt verglichen mit den gleichaltrigen untrainierten Personen. Der RER war bei diesen Altersklassen im Durchschnitt signifikant geringer. In einer weiteren Studie untersuchten Bassett et al. (1991) die Abnahmerate des Blutlaktatspiegels nach einem Radergometertest bei trainierten Sportlern und Untrainierten. Dabei fuhren neun trainierte Probanden ( $VO_{2max}$   $65,5 \pm 3,3$  ml/min/kg) und acht untrainierte Personen ( $VO_{2max}$   $42,2 \pm 2,8$  ml/min/kg) einen dreiminütigen Test auf dem Radergometer bei 85 bzw. 80 % ihrer  $VO_{2max}$ . So wollten die Wissenschaftler erreichen, dass alle Probanden einen ähnlichen maximalen Laktatwert aufwiesen. Anschließend ist während der 60-minütigen passiven Erholungsphase in regelmäßigen Abständen die Laktatkonzentration von den Probanden gemessen worden. Anhand der Ergebnisse konnten die Autoren feststellen, dass die trainierten Sportler das Laktatmaximum  $2,8 \pm 0,4$  Minuten nach der Belastung erreicht haben, währenddessen die untrainierten Probanden nach  $3,8 \pm 0,4$  Minuten den Laktatpeak aufwiesen. Dieser Unterschied war statistisch signifikant. Das schnellere Erreichen des Peakwertes weist auf einen zügigeren Abfluss des Laktats von dem Muskel in das Blut hin. Sowohl bei der Abnahmerate der Laktatkonzentration als auch der Halbwertszeit konnten während der passiven Erholungsphase keine signifikanten Unterschiede zwischen Trainierten und Untrainierten ermittelt werden. Die trainierten Sportler wiesen einen Koeffizienten der mittleren Abnahmerate von  $0,0587 \pm 0,004$  pro Minute sowie eine Halbwertszeit von  $12,21 \pm 0,87$  Minuten auf. Die untrainierten Personen erreichten einen Koeffizienten der mittleren Laktatabnahmerate von  $0,0579 \pm 0,004$  sowie eine Halbwertszeit von  $12,24 \pm 0,68$  Minuten. Auf Grundlage der Ergebnisse schlossen die Wissenschaftler, dass die Abnahmerate des Blutlaktatspiegels, wie bisher angenommen nicht vom Trainingsstatus abhängig ist. Bei der Betrachtung der  $VO_{2max}$ -Werte während und nach der Belastung konnten vor allem während der Belastungsphase Unterschiede zwischen beiden Gruppen festgestellt werden. In den letzten 30 Sekunden des 3-minütigen Test erreichten die Trainierten eine Sauerstoffaufnahme von  $4,0 \pm 0,32$  l/min, was 84,5 % der  $VO_{2max}$  entsprach. Die untrainierten Probanden erzielten in den letzten 30 Sekunden eine Sauerstoffaufnahme von  $2,98 \pm 0,49$  l/min. Dies waren 79,6 % der maximalen Sauerstoffaufnahme. Beide Gruppen erreichten in der fünften Minute der Erholungsphase das Ruhenniveau der Sauerstoffaufnahme ( $0,3$  l/min). Weiterhin waren die trainierten Sportler in der Lage signifikant höhere Leistungen über die drei Minuten zu treten ( $314 \pm 10$  W) verglichen mit den untrainierten Personen ( $221 \pm 15$  W). Evans & Cureton (1983) konnten ebenfalls nach einem sechswöchigen

Trainingsprogramm, welches zu einer signifikanten Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit führte, keine signifikanten Unterschiede in der Abbaurate des Blutlaktatpiegels während der 30-minütigen Erholungsphase feststellen. Trapp et al. (2007) untersuchten ebenfalls die metabolische Reaktion von trainierten und untrainierten Frauen während hochintensiver, wiederkehrender Belastungen auf dem Radergometer und welchen Einfluss die Belastungs- sowie Erholungslänge aufwies. Dazu führten jeweils acht trainierte und acht untrainierte Frauen an zwei unterschiedlichen Tagen einen Ergometertest über 20 Minuten mit kurzen Sprints (8 s Sprint, 12 s aktive Pause) beziehungsweise langen Sprints (24 s Sprint, 36 s aktive Pause) durch. Sowohl bei den kurzen ( $139,4 \pm 1,7$  vs.  $86,6 \pm 2,6$  W) als auch den langen Intervallbelastungen ( $167,1 \pm 3,8$  vs.  $105,4 \pm 4,2$  W) erreichten die Trainierten eine signifikant höhere durchschnittliche Leistung als die untrainierten Personen. Das Herzfrequenzverhalten wies sowohl bei den kurzen als auch den langen Intervallbelastungen zwischen beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede auf. Weiterhin erreichten die trainierten Frauen über den Testverlauf von 20 Minuten bei beiden Testprotokollen eine signifikant höhere absolute Sauerstoffaufnahme. Prozentual auf die maximale Sauerstoffaufnahme bezogen gab es zwischen den trainierten Probanden ( $69\% \text{ VO}_{2\text{peak}}$ ) und den untrainierten Personen ( $65\% \text{ VO}_{2\text{peak}}$ ) keine signifikanten Differenzen. Bezüglich der Laktatkonzentration konnte bei den Untrainierten zwischen den beiden Testprotokollen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden, wohingegen die trainierten Sportlerinnen signifikant höhere Laktatwerte bei der Testdurchführung mit langen Intervallen aufwiesen. Hamilton et al. (1991) verglichen die physiologische Reaktion von Ausdauersportlern und Athleten aus Spisportarten auf wiederholende, maximale Belastungen. Hierbei absolvierten jeweils sechs sehr gut ausdauertrainierte Läufer ( $\text{VO}_{2\text{max}} 60,8 \pm 4,1$  ml/min/kg) und Mannschaftssportler ( $\text{VO}_{2\text{max}} 52,5 \pm 4,9$  ml/min/kg) einen wiederholenden Sprinttest auf einem nicht motorisierten Laufband. Die Testdurchführung umfasste zehn Sprints über jeweils sechs Sekunden mit einer Erholungszeit von 30 Sekunden. Die Laufgeschwindigkeit, die erbrachte Leistung sowie die Sauerstoffaufnahme wurden für jede Sprintbelastung ermittelt. Weiterhin ist die Blutlaktatkonzentration nach der Testdurchführung bestimmt worden. Die Spisportler erreichten sowohl in der maximalen Leistung ( $839 \pm 114$  vs.  $777 \pm 89$  W) als auch der maximalen Laufgeschwindigkeit ( $7,03 \pm 0,3$  vs.  $6,71 \pm 0,3$  m/s) höhere Werte. Die Unterschiede waren allerdings nicht signifikant. Über den Testverlauf wiesen die Spisportler einen signifikant höheren Abfall der mittleren Leistung auf ( $29,3 \pm 8,1$  vs.  $14,2 \pm 11,1\%$ ) sowie eine signifikant höhere Blutlaktatkonzentration am Ende des Tests  $15,2 \pm 1,9$  vs.  $12,4 \pm 1,7$  mmol/l). Den höheren Leistungsabfall der Spisportler in den wiederkehrenden Sprintbelastungen erklären sich die Wissenschaftler mit einer höheren glykolytischen Rate, welche wiederum mit einer höheren Blutlaktatkonzentration und einer geringeren Sauerstoffaufnahme zusammenhängt. Zusammenfassend geben Tomlin & Wenger (2001) in ihrem Übersichtsartikel an, dass das Level der aeroben Fitness in einem Zusammenhang mit der

Erholungsfähigkeit nach hochintensiven, wiederkehrenden Belastungen steht. Eine bessere aerobe Fitness führt laut den Autoren zu einer erhöhten Sauerstoffaufnahme nach der Belastung sowie zu einem schnelleren Laktatabbtransport, was wiederum in einer verbesserten Erholungsfähigkeit resultiert.

## 2.3 Altersspezifische Unterschiede

### 2.3.1 Muskulatur

Aufgrund des immer weiter voranschreitenden demografischen Wandels, der damit verbundenen verlängerten Lebenserwartung und Lebensarbeitszeit sowie einer starken Verbreitung von Bewegungsmangel und Übergewicht kommt dem Erhalt von Gesundheit und Leistung eine immer stärkere Bedeutung zu. Dadurch, dass die Bevölkerung in den kommenden Jahren immer weiter altert, im Jahr 2020 sind über 45 % der Menschen über 50 Jahre, werden den Faktoren Alter, Gesundheit und Leistung immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt (Vgl. Leyk et al., 2010, S. 809). Während der gesamten Lebensdauer ist die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Funktionssysteme einem permanenten Wechsel unterlegen. Die Änderungsraten im Altersverlauf variieren dabei je nach Funktionssystem. Auch die Körperzellen unterliegen einem natürlichen Alterungsprozess. Dieser entsteht durch die DNA-Schädigung und durch Fehler in den Reparaturmechanismen. Die Veränderungen betreffen alle Organsysteme und führen ebenfalls zu einer verringerten körperlichen Leistungsfähigkeit (Schmidt et al., 2017). Die Muskelmasse und Muskelleistung steigt bis zum frühen Erwachsenenalter an und erreicht zwischen dem 20. und 27. Lebensjahr die maximale Ausprägung. Mit zunehmendem Alter nimmt sowohl die Skelettmuskelmasse als auch die Muskelleistung ab, sofern kein Ausdauer- oder Krafttraining durchgeführt wird (Fell & Williams, 2008). Im höheren Alter geht die Entwicklung der Muskeln zurück zu einem Zustand, ähnlich dem vor der vollständigen Ausbildung (s. Tab. 5). Von dem Abbau der Muskeln sind vor allem die Beine betroffen (Daffner & Royal College of Physicians of Edinburgh, 2016). Dieser als Sarkopenie beschriebene Prozess führt somit zu einer Abnahme der Mobilität sowie zu einem Anstieg des Risikos für Morbiditäten und Mortalitäten. Zahlreiche Mechanismen sind dabei für die strukturelle und funktionelle Verschlechterung verantwortlich (McCormick & Vasilaki, 2018).

Tab. 5. Alters- und geschlechtsspezifische Verteilung der Muskelmasse in Prozent

Alter (J)	Muskelmasse Mann (%)	Muskelmasse Frau (%)
10 - 19	43 - 57	35 - 43
20 - 49	40 - 54	31 - 39
50 - 100	37 - 48	27 - 34

Neben der Abnahme der Muskelmasse haben weitere altersbedingte morphologische und physiologische Veränderungen einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Somit kommt es mit zunehmendem Alter zu einem selektiven Verlust von schnellen Muskelfasern und motorischen Einheiten sowie zu einer Abnahme der Muskelquerschnittsfläche und der Anzahl von Satelliten-Zellen. Dies geht unter anderem mit einer verringerten Regenerationsfähigkeit der Muskelzellen und einer Veränderung der Muskelarchitektur einher. Studien an Gewichthebern im Seniorenbereich zeigten dabei eine Verlustrate der maximalen Muskelkraft von 1,05 bis 1,50 % pro Jahr, unabhängig von dem Körpergewicht (Meltzer, 1994). Derartige Bewegungsausführungen werden durch eine optimale Rekrutierung der Typ-II-Fasern erbracht. Der Verlust von Muskelmasse und Kraft wird dabei durch den Rückgang von Größe und Anzahl der Typ-II-Muskelfasern im Alter erklärt (Lexell & Downham, 1992). Mehrere Querschnittstudien zeigen eine signifikant größere Muskelmasse bei Kraftsportlern im Seniorenbereich verglichen mit einer überwiegend sitzenden Kontrollgruppe gleichen Alters (Klitgaard et al., 1990; Sipilä & Suominen, 1991). Zusätzlich zeigt die Studie von Klitgaard et al. (1990), dass die Muskelmasse, die Muskelkraft, die Muskelkontraktionscharakteristik und die Histologie von Muskelzellen von 68-jährigen Kraftsportlern auf dem gleichen Niveau waren wie bei jungen untrainierten Personen. Aus diesen Erkenntnissen schlussfolgerten die Wissenschaftler, dass Krafttraining den altersbedingten Verlust von Muskelmasse und Muskelfunktionalität bis mindestens zum Lebensalter von 70 Jahren verhindern kann. Auch der Einfluss eines Ausdauertrainings auf die Muskelmasse und Muskelfunktion wurde in vielen Studien untersucht. Dabei passt sich die Skelettmuskulatur strukturell und metabolisch durch Ausdauertraining bei älteren Personen an (Coggan et al., 1993). Mehrere Studien zeigten allerdings auch, dass Ausdauertraining allein nicht ausreichend ist, um einen Erhalt der Skelettmuskelmasse und Muskelfunktion mit zunehmendem Alter zu erreichen (Klitgaard et al., 1990; Sipilä & Suominen, 1991). In den eben genannten Untersuchungen wurde aufgezeigt, dass ältere ausdauertrainierte Sportler eine geringere Muskelmasse und Muskelkraft aufweisen als junge untrainierte Personen. Einzig eine Studie konnte bei älteren ausdauertrainierten Sportlern eine höhere Muskelkraft, aber keine höhere Muskelmasse feststellen, im Vergleich zu gleichaltrigen sitzenden Personen (Sipilä et al., 1991). Weiterhin haben hormonelle und immunologische Veränderungen einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit im Alter. Im Altersverlauf kommt es zu einer Abnahme von Wachstumshormonen, wie beispielsweise Testosteron und zu einer Zunahme von Interleukinen (IL, IL-6), Tumornekrosefaktor-alpha und Myostatin (Glenmark et al., 1992; McCormick & Vasilaki, 2018). Außerdem führt die Abnahme der anabol wirkenden Androgene zu einer Rückbildung der Muskelfasergröße, einer Zunahme des Bindegewebes und zu einem Anstieg des Körperfettanteils. Dies geht zugleich mit einer Verringerung der Muskelkraft einher (Finkelstein et al., 2013). Eine Verringerung der Testosteronproduktion bei älteren Männern und eine Reduzierung der Androgenproduktion in Zusammenhang mit einem niedrigen Östrogenspiegel bei

älteren Frauen führen zu einer Abnahme der Geschwindigkeit der Proteinsynthese nach intensiver Muskelanstrengung (Häkkinen et al., 2000).

### *2.3.2 Laktatbildung und Laktatabbau*

Die maximale Laktatbildungsrate ist durch die Leistungsfähigkeit und die Trainierbarkeit der schnellen Muskelfasern bestimmt. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel näher erläutert, nimmt sowohl die Größe als auch die Anzahl der Typ-II-Muskelfasern im Alter ab. Daraus ergibt sich im hohen Alter eine geringere maximale Laktatbildungsrate als zum Zeitpunkt der maximalen Leistungsfähigkeit (20 bis 30 Jahre). Die maximale Laktatkonzentration nach hochintensiven Belastungen ist bei gut trainierten Sportlern höher als bei nicht trainierten Menschen. Mit zunehmendem Alter nimmt die anaerobe Energieproduktion durch Glykolyse ab, was eine Erklärung für eine verringerte Sprintleistung im hohen Alter darstellen kann (Korhonen et al., 2005). Die generelle Abnahme der Muskelmasse sowie die Atrophie der schnellen Muskelfasern hat ebenfalls den Effekt, dass es mit zunehmenden Alter im Muskelprofil zu einer vermehrten Verschiebung in den oxidativen Bereich kommt (Porter et al., 1995). Die altersbedingten Veränderungen in der Muskelarchitektur führen zu einer verringerten Stoffwechselkapazität von Kreatinphosphat und einer reduzierten Geschwindigkeit der Glykolyse und Laktatbildung. Durch die Verringerung der glykolytischen Enzyme, insbesondere der Phosphofruktokinase kann es ebenfalls zu einer Abnahme der anaeroben Energiebereitstellung kommen (Hunter et al., 2002). Dies hat ebenfalls zur Folge, dass eine Reduzierung der Laufgeschwindigkeit an der Laktatschwelle mit zunehmenden Alter bei Ausdauersportlern eintritt (Wiswell et al., 2000). Allerdings scheint sich die Laktatschwelle im Altersverlauf nicht zu verändern, wenn sie in Bezug zu der prozentualen maximalen Sauerstoffaufnahme gesetzt wird (Evans et al., 1995). Daher scheint die Senkung der Laktatschwelle mit zunehmenden Alter nicht der Grund für eine Verringerung der Leistungsfähigkeit zu sein, sondern eher die Abnahme der maximalen Sauerstoffaufnahme (Tanaka & Seals, 2008). Zu dieser Erkenntnis kamen auch Marcell et al. (2003) in ihrer 6-jährigen Längsschnittstudie an Alterklassensportlern. Die Autoren konnten feststellen, dass es über den Zeitraum zu keiner Änderung der Laufleistung an der Laktatschwelle kommt, wenn diese prozentual in Bezug zur  $VO_{2max}$  gesetzt wurde. Weiterhin kommt es mit zunehmendem Alter zu einer Reduzierung der Glukosetransporter, welche die insulinabhängige Glukoseaufnahme in den Skelettmuskeln, Herzmuskelzellen und Fettzellen regulieren. Damit wird die Wirksamkeit des Glukosetransports eingeschränkt, was wiederum einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Erholung von älteren Sportlern haben kann (Hall et al., 1994).

### 2.3.3 Herz-Kreislauf-System

Grundsätzlich treten im Altersverlauf strukturelle Veränderungen am Herz-Kreislauf-System auf. Mit steigendem Alter kommt es zur Zunahme der Wanddicke des linken Ventrikels. Diese führt jedoch nicht zu einer Herzvergrößerung und hat ein schlechteres Ansprechen auf beta-adrenerge Reize zur Folge. Weiterhin ist ein Anstieg des systolischen Blutdrucks und einem damit verbundenen Anstieg des mittleren arteriellen Blutdrucks zu verzeichnen. Folgeerscheinungen können dabei eine Sklerosierung und ein Elastizitätsverlust der Arterien sein (Klinke et al., 2010; Schmidt et al., 2017). Wie bereits in Kapitel 2.1.3 dargestellt gibt es grundsätzlich keine Geschlechtsunterschiede zwischen der maximalen Herzfrequenz von Jungen und Mädchen sowie Männern und Frauen. Im Altersverlauf nimmt die  $HF_{max}$  allerdings ab, was bereits die teils trivialen Formeln zur Berechnung der maximalen Herzfrequenz  $HF_{max} = 220 - \text{Lebensalter}$  (Fox et al., 1971) oder  $HF_{max} = 208 - 0,7 \times \text{Alter}$  (Tanaka et al., 2001) implizieren. Ein Kraft- oder Ausdauertraining hat dabei keinen Einfluss auf die Abnahme der  $HF_{max}$ . Ab dem frühen Erwachsenenalter nimmt die maximale Herzfrequenz mit einer Rate von 0,7 Schlägen pro Jahr bei gesunden, ausdauertrainierten Erwachsenen ab (Tanaka et al., 2001). Dabei wird davon ausgegangen, dass die verringerte Reaktionsfähigkeit des Sinusknotens auf beta-adrenerge Stimulationen sowie eine verminderte intrinsische Herzfrequenz zu den Mechanismen gehören, die die maximale Herzfrequenz mit zunehmenden Alter senken (Fleg et al., 1994). Die Regressionsgleichung drückt dabei eine hohe interindividuelle Varianz bei gesunden Erwachsenen aus, welche hauptsächlich durch das Alter beeinflusst wird und unabhängig von Geschlecht und körperlicher Aktivität ist. Mit zunehmendem Alter kommt es ebenfalls zu einer Reduzierung des maximalen Herzzeitvolumens, des maximalen Schlagvolumens und der arteriovenösen Sauerstoffdifferenz (s. Tab. 6).

Tab. 6. Sauerstoffverbrauch und die bestimmenden Faktoren bei maximaler Ausdauerbelastung bei trainierten Männern (Tanaka & Seals, 2008)

	<b>Junge Männer (28 Jahre)</b>	<b>Alte Männer (60 Jahre)</b>	<b>Altersbedingte Veränderung (%)</b>
Sauerstoffverbrauch (ml/kg/min)	68,2	49,4	28
Herzzeitvolumen (l/min)	27,0	21,7	20
Schlagvolumen (ml)	147	132	10
Herzfrequenz (S/min)	184	165	10
a-v-Sauerstoffdifferenz (ml/100ml)	16,7	15,2	8

Eine Vielzahl an Studien konnte zeigen, dass das Herzzeitvolumen mit zunehmenden Alter bei gesunden, sitzenden Erwachsenen abnimmt, im Verhältnis zum Rückgang des maximalen Sauerstoffverbrauchs (Hunt et al., 1998; Proctor et al., 1998). Außerdem ist das Herzzeitvolumen bei Altersklassensportlern (60-70 Jahre) im Vergleich zu jungen, ausdauertrainierten Sportlern (20-30 Jahre)

verringert, resultierend aus einer Abnahme des Schlagvolumens und der maximalen Herzfrequenz (Ogawa et al., 1992). Die Abnahme der maximalen Herzfrequenz wird als einer der wesentlichen Mechanismen angesehen, die zu einer altersbedingten Verringerung des maximalen Herzzeitvolumens und maximalen Sauerstoffaufnahme, insbesondere bei ausdauertrainierten Sportlern führt (Hagberg et al., 1985). Das maximale Schlagvolumen ist bei älteren ausdauertrainierten Erwachsenen leicht auf 80-90 % des Niveaus von jungen ausdauertrainierten Erwachsenen reduziert (Ogawa et al., 1992). Dabei gibt es wenige gesicherte Informationen, welche Faktoren zu einer altersbedingten Verringerung des Schlagvolumens führen. Tanaka & Seals (2008) vermuten, dass beispielsweise die Vorspannung, die Nachlast sowie die intrinsische Kontraktilität des Herzens einen Einfluss auf die Abnahme haben. Des Weiteren ist unklar, ob eine Reduzierung der linksventrikulären Füllung mitverantwortlich ist. Auch das Gesamtblutvolumen kann dabei einen Einfluss auf die Abnahme des maximalen Schlagvolumens im Alter haben. Weiterhin führen Tanaka et al. (2000) an, dass der Grad der zunehmenden arteriellen Versteifung im Alter ein Mechanismus sein kann, der zur Abnahme des Schlagvolumens führt. Außerdem kommt es durch die Verminderung der arteriovenösen Sauerstoffdifferenz zu einer geringeren Sauerstoffmehraufnahme in den Lungen. Eine maximale Sauerstoffaufnahme in das durch die Lungenalveolen strömende Blut ist nur möglich, wenn möglichst viel Sauerstoff in der Peripherie dem arteriellen Blut entzogen werden kann (Weineck, 2004). Diese altersbedingten Veränderungen des kardiovaskulären Systems führen somit in der Summe zu einer verringerten Leistungsfähigkeit.

### *2.3.4 Ventilation*

Der Änderung der maximalen Sauerstoffaufnahme im Altersverlauf wird eine große Bedeutung beigemessen. Die kardiorespiratorische Fitness hat einen wesentlichen Einfluss auf die funktionelle Unabhängigkeit, die Lebensqualität sowie auf das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen und die Gesamtmortalität (Myers et al., 2002). Grundsätzlich ist festzustellen, dass die maximale Sauerstoffaufnahme sowohl bei nicht trainierten als auch trainierten älteren Menschen sinkt (Faulkner et al., 2008). Dabei zeigen Studienergebnisse einen Rückgang der maximalen Sauerstoffaufnahme um 10 % pro Jahrzehnt bei Frauen und Männern, unabhängig vom Aktivitätsniveau (Astrand, 1960). Allerdings erfolgt die Abnahme bei trainierten Altersklassensportlern auf einem höheren Niveau, aufgrund der höheren körperlichen Aktivität und Fitness. Ein hochintensives Training kann diese Verschlechterung um bis zu 50 % bei Männern jungen und mittleren Alters reduzieren. Bei älteren Männern ist dies allerdings nicht in dem Maße möglich. Frauen mittleren Alters oder ältere Frauen sind durch Training nicht in der Lage die Verlustrate der maximalen Sauerstoffaufnahme auf weniger als 10 % pro Dekade zu senken. Es wird dabei vermutet, dass dies mit dem Östrogenstatus zusammenhängt



(Hawkins & Wiswell, 2003). Hartmann et al. (2018) schätzen, dass die relative maximale Sauerstoffaufnahme ohne wesentliche Geschlechtsunterschiede zwischen dem 30. und 39. Lebensjahr um 6 % sinkt, zwischen dem 40. und 49. Lebensjahr um 11 %, zwischen dem 50. und 59. Lebensjahr um 15 % und zwischen dem 60. und 69. Lebensjahr um 6 % abnimmt. Bei einer Aufsummierung der Veränderung über die Altersspanne (30 bis 69 Jahre) kommen die Autoren auf eine Abnahme der maximalen physischen Leistungsfähigkeit von 38 % bei den Männern und 39 % bei den Frauen. Loe et al. (2013) haben zur Ermittlung der aeroben physiologischen Fitness eine Referenzstudie an der norwegischen Bevölkerung durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die weiblichen Probanden im Vergleich zu den männlichen Teilnehmern in allen Altersklassen 65 % der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der maximalen Wattleistung in einem Ausbelastungstest erreichen konnten. Bei der relativen Betrachtung der Ergebnisse auf das Körpergewicht, lag die Leistungsfähigkeit der Frauen bei 83 % gegenüber den Männern. Der Vergleich des relativen Abfalls der Leistung für jede Altersgruppe, bezugnehmend auf die höchste Leistungsfähigkeit zwischen dem 21. und 30. Lebensjahr zeigt bei beiden Geschlechtern eine deutliche Leistungsminderung um das 50. Lebensjahr (s. Tab. 7). Oberhalb dieser Altersgrenze ist ein Rückgang der aeroben Leistungsfähigkeit von mehr als 15 % zu sehen. Bei der Altersgruppe über 60 Jahren ist eine Reduzierung von mehr als 20 % gegenüber der Ausgangsleistung junger Menschen sichtbar. Somit konnten die Wissenschaftler einen Rückgang der aeroben Kapazität und Leistungsfähigkeit mit zunehmendem Alter nachweisen.

Tab. 7. Vergleich der Leistungen der männlichen und weiblichen Probanden – wahrscheinlicher relativer Rückgang mit dem steigendem Lebensalter (nach Loe et al., 2013)

	Alter (in J)				
	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69
<b>Männer (in %)</b>					
VO <sub>2max</sub> -Abfall/20-29	100,0	97,6	93,3	84,5	76,4
Watt-Abfall/20-29	100,0	95,0	94,5	86,5	80,0
<b>Frauen (in %)</b>					
VO <sub>2max</sub> -Abfall/20-29	100,0	100,0	96,4	85,7	78,5
Watt-Abfall/20-29	100,0	100,0	97,7	91,4	86,0

Die Längsschnittstudie von Stathokostas et al. (2004) untersuchte über einen Zeitraum von 10 Jahren, wie sich die aerobe Leistung, in Form der maximalen Sauerstoffaufnahme und der ventilatorischen Schwelle bei älteren Männern und Frauen verändert. Die getesteten Probanden hatten dabei ein durchschnittliches Alter von über 72 Jahren und absolvierten in regelmäßigen Abständen einen Gehtest auf dem Laufband. Bei den männlichen Probanden konnte eine jährliche Abnahme der maximalen Sauerstoffaufnahme von 0,43 ml/min/kg festgestellt werden. Die Verringerung der VO<sub>2max</sub> ging mit einer gleichzeitigen Abnahme der HF<sub>max</sub>, ohne Änderung des maximalen Sauerstoffpulses einher. Die Frauen zeigten eine

langsamere jährliche Abnahmerate der  $VO_{2max}$  (0,19 ml/min/kg) und eine ebenfalls verringerte  $HF_{max}$ , bei einem konstanten maximalen Sauerstoffpuls. Die Einbeziehung der körperlichen Aktivität auf die Änderungen in der  $VO_{2max}$  ergab keine Signifikanz. Sowohl bei den Männern als auch den Frauen konnten die Wissenschaftler einen nicht signifikanten Rückgang der ventilatorischen Schwelle feststellen. Insgesamt zeigte die Längsschnittstudie über 10 Jahre, dass die männlichen Probanden einen Rückgang der  $VO_{2max}$  von 14 % aufwiesen und die weiblichen Teilnehmer, im selben Zeitraum nur eine Reduzierung der  $VO_{2max}$  von 7 % verzeichneten. Eine weitere Studie von Leyk et al. (2010) hat allerdings gezeigt, dass ein intensives Ausdauertraining enormes Potential aufweist, um den Rückgang der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit zu verringern. Im Rahmen dieser Untersuchung haben die Wissenschaftler die Laufzeiten von insgesamt 552.528 Marathon- und 374.425 Halbmarathonläufen analysiert. Die Stichprobe umfasste die Daten von 305.888 Männern und 70.425 Frauen im Alter zwischen 20 und 79 Jahren. Die Ergebnisse der Analyse zeigten, dass es sowohl bei den Halb- als auch den Marathonläufern in der Altersspanne von 20 bis 55 Jahren keine signifikanten Unterschiede in der Laufzeit gegeben hat. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Leistungseinbußen bei beiden Strecken gering ausfallen. Ein erheblicher Teil von Seniorensportlern war schneller als die jungen Athleten. Die Hälfte der Läufer zwischen 20 und 54 Jahren erreichte das Ziel nach den besten 25 % der 65- bis 69-Jährigen. Einen signifikanten Leistungsabfall konnte sowohl bei Männern als auch bei den Frauen erst ab dem 54. Lebensjahr festgestellt werden. Somit konnten die Autoren mit der Laufzeitanalyse feststellen, dass es im mittleren Lebensalter nicht zwangsläufig bereits zu Leistungseinbußen kommen muss und dass regelmäßiges Training auch im hohen Alter zu sehr guten Leistungen führen kann.

### *2.3.5 Beanspruchungs- und Erholungskinetik*

Zu der Thematik, inwiefern das Alter einen Einfluss auf die Beanspruchungs- und Erholungskinetik hat, gibt es bereits eine Vielzahl an wissenschaftlichen Studien. Dabei wurde die Erholungsfähigkeit von jungen und alten Probanden nach intensiven Belastungen untersucht. Eine Auswahl an wissenschaftlichen Untersuchungen wird im Folgenden dargestellt. Sultana et al. (2012) untersuchten in einer Studie das Erholungsniveau, anhand der maximalen isometrischen Drehmomente sowie der kardiorespiratorischen Parameter bei gut ausdauertrainierten jungen Sportlern ( $n = 9$ ) und Altersklassenathleten ( $n = 10$ ) vor und nach einem Triathlon (Olympische Distanz). Einen Tag vor und 24 Stunden nach dem Wettkampf führten die Probanden drei maximale Knieextensionen und -flexionen sowie einen Laufbandstufentest, zur Ermittlung der maximalen Drehmomente, der maximalen Sauerstoffaufnahme, der maximalen Laufgeschwindigkeit sowie der Geschwindigkeit an den ventilatorischen Schwellen durch. Die Endzeiten der Alterssportler waren verglichen mit den jüngeren Athleten durchschnittlich 32 Minuten langsamer. Vor dem Wettkampf sind die

maximale Sauerstoffaufnahme, die maximale Laufgeschwindigkeit sowie die Geschwindigkeit an den ventilatorischen Schwellen bei den Altersklassenathleten signifikant niedriger gewesen. Das maximale isometrische Drehmoment war bei beiden Probandengruppen nahezu gleich. 24 Stunden nach der Veranstaltung zeigten sowohl die jungen Sportler als auch die alten Athleten eine ähnliche signifikante Abnahme der  $VO_{2max}$  (6,2 % vs. 3,1 %) und der Laufgeschwindigkeit an der maximalen Sauerstoffaufnahme (5,6 % vs. 9,5 %). Die Geschwindigkeit an der ventilatorischen Schwelle 2 nahm nur bei den Alterssportlern signifikant ab (8,3 %). Bei den maximalen isometrischen Drehmomenten konnten keine signifikanten Veränderungen bei beiden Gruppen festgestellt werden. Die Autoren schlussfolgerten aus diesen Erkenntnissen, dass bei gut ausdauertrainierten Sportlern die Wettkampfbelastung während einem Triathlon sowie die Ermüdung 24 Stunden nach der Veranstaltung unabhängig vom Alter sind. In einer weiteren Studie untersuchten Easthope et al. (2010) die Erholungsfähigkeit von 10 jungen Sportlern und 13 Altersathleten nach einem 55 km langen Trailrunning-Wettkampf. Die Probanden führten vor sowie bis 72 Stunden nach der Veranstaltung Radergometertests, isometrische Maximalkrafttests sowie Blutuntersuchungen durch. Die persönlichen Bestleistungen sowie die Endzeiten des Wettkampfes unterschieden sich nicht signifikant zwischen den beiden Altersgruppen. Die Ergebnisse zeigten bei beiden Probandenkollektiven eine Zunahme der Muskelschädigungsmarker (CK und LDH) nach dem Rennen, eine Abnahme der isometrischen Maximalkraft sowie eine Zunahme der Kontraktionszeit. Die Altersklassensportler zeigten eine ähnliche Muskelschädigung und –ermüdung wie die jungen Sportler, allerdings war die Erholung verlangsamt. Somit konnten anhand der Ergebnisse Unterschiede in der Muskelregeneration zwischen jungen und alten Sportlern ähnlichen Leistungsniveaus festgestellt werden. Fell et al. (2008) und Fell & Williams (2008) untersuchten den Einfluss des Alters auf die Ermüdung und die Erholung nach hochintensiven Belastungen bei Radfahrern. Dabei wurden jeweils neun junge und alte Probanden an drei aufeinanderfolgenden Tagen mit einem 30-minütigen Zeitfahren auf dem Radergometer getestet. Die Wissenschaftler ermittelten für jeden Versuch die durchschnittliche Leistung, die Herzfrequenz sowie die Blutlaktatkonzentration. Weiterhin wurden die Wahrnehmung des Muskelschmerzes sowie die Muskelermüdung und Muskelerholung aufgezeichnet. Zusätzlich sind vor jedem Testtag isometrische Maximalkrafttests, ein Counter-Movement-Jump sowie ein 10-sekündiger Sprint auf dem Radergometer durchgeführt worden und es wurde die Creatin-Kinase (CK) bestimmt. Bei beiden Altersgruppen gab es keine Änderung der durchschnittlichen Leistung über den Testverlauf von drei Tagen. Bei den Alterssportlern kam es zu einer signifikanten Veränderung des wahrgenommenen Muskelschmerzes, der Muskelermüdung und der Muskelerholung über die drei Tage. Bei den jungen Probanden waren keine signifikanten Unterschiede sichtbar. Die Änderung des wahrgenommenen Muskelschmerzes vom ersten Testtag bis zum dritten Testtag war bei den Alterssportlern signifikant höher als bei den jungen Probanden. Daraus schlossen

die Autoren, dass eine hochintensive Belastung bei älteren, gut trainierten Sportlern eine verminderte Erholung sowie erhöhte Müdigkeit und wahrgenommenen Muskelschmerz hervorrufen, ohne dass die körperliche Leistungsfähigkeit abnimmt. Eine weitere Studie von Chamari et al. (2000) untersuchte die Erholungsprozesse bei jungen und alten Sportlern nach einem Stufentest auf dem Radergometer sowie einer 6-sekündigen Sprintbelastung. Dabei wiesen die jüngeren Sportler eine höhere maximale Sauerstoffaufnahme, verglichen mit den älteren Probanden auf. Weiterhin verzögerte sich die Wiederherstellung der ventilatorischen Parameter ( $VCO_2$  und VE) nach der 6-sekündigen Sprintbelastung bei den Altersklassensportlern. In einer Studie von Buchheit et al. (2010) ist untersucht worden, welchen altersbedingten Einfluss es auf die Herzfrequenzwiederherstellung, die Leistung sowie die Blutlaktatkonzentration nach kurzen hochintensiven Belastungen gibt. Zehn präpubertäre Jungen ( $9,6 \pm 0,7$  Jahre), sechs Jugendliche ( $15,2 \pm 0,8$  Jahre) und sieben Männer ( $20,4 \pm 1,0$  Jahre) absolvierten 10-mal 10-sekündige All-Out Sprints, unterbrochen mit einer 5-minütigen passiven Regenerationsphase auf dem Radergometer. Dabei wurde die durchschnittliche Leistung für jeden Sprint gemessen sowie die Herzfrequenzwiederherstellung und die Blutlaktatkonzentration direkt nach der All-Out-Belastung bestimmt. Kinder zeigten dabei eine signifikant schnellere Herzfrequenzwiederherstellung als Jugendliche und Erwachsene. Zwischen Jugendlichen und Erwachsenen konnte kein signifikanter Unterschied beobachtet werden. Die durchschnittliche Leistung sowie die Blutlaktatkonzentration waren bei Kindern im Vergleich zu den Jugendlichen und Erwachsenen geringer. Die Autoren schlussfolgerten, dass die schnellere Herzfrequenzwiederherstellung bei Kindern teilweise mit der geringeren Leistungsrate sowie einem inhärenten Mangel an anaerober Stoffwechsellkapazität zusammenhängen kann. Hebestreit et al. (1993) untersuchten ebenfalls einen Alterseffekt bei Kindern und Erwachsenen mit ähnlichem Leistungsniveau in dem Erholungsverhalten nach kurzen hochintensiven Belastungen. Beide Probandengruppen wiesen eine ähnliche maximale Sauerstoffaufnahme auf ( $49,6 \pm 6,6$  vs.  $51,1 \pm 6,6$  ml/min/kg) auf. Insgesamt acht Jungen ( $10,3 \pm 1,4$  Jahre) und acht Männer ( $21,6 \pm 1,6$  Jahre) absolvierten zwei WAnTs mit unterschiedlichen Regenerationszeiten. Die drei Testtermine sahen eine Minute, zwei Minuten beziehungsweise zehn Minuten als Erholungszeit zwischen beiden WAnTs vor. Die maximale Tretleistung während der jeweiligen WAnTs (in W/kg) war ausnahmslos bei den Erwachsenen höher als bei den Kindern. Innerhalb des WAnT wiesen die Kinder einen geringeren Leistungsabfall auf als die Erwachsenen. Darüber hinaus zeigten die Erwachsenen eine verzögerte Wiederherstellungsrate bei der Erholung der Herzfrequenz, dem respiratorischen Quotienten, der  $VCO_2$ , der  $VO_2$  und VE. Die Autoren schlussfolgerten aus diesen Ergebnissen, dass Kinder nach kurzen hochintensiven Belastungen schneller regenerieren als erwachsene Personen. Als mögliche Gründe führten die Wissenschaftler auf, dass Kinder eine geringere Abhängigkeit von der Glykolyse bei WAnTs aufweisen, was zu einer geringen Azidose führt. Weiterhin kann auch ein schnellerer Abtransport von Metaboliten nach hochintensiven Belastungen bei

Kindern zu einer besseren Regeneration führen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine verminderte Belastbarkeit von älteren und alternden Sportlern auf eine längere Regenerationszeit nach sportlichen Belastungen zurückzuführen ist. Durch die im Alter abnehmende Proteinsynthese ist eine deutlich längere Erholungszeit nach Belastungen notwendig (Neumann et al., 2019).

#### *2.4 Wingate Anaerobic Test*

Anaerobe Messverfahren werden in Tests unterteilt, welche die anaerobe Leistungsfähigkeit sowie die anaerobe Kapazität bestimmen. Dabei beinhalten die anaeroben Leistungstests unter anderem Kraft-Geschwindigkeit-Messverfahren (isokinetisch, isometrisch), vertikale Sprungkraft-Tests, Treppenstufentests sowie Radergometer-Tests. Die maximale anaerobe Leistungsfähigkeit, welche mittels der unterschiedlichen Testprotokolle erhoben wird, differiert zwar in Abhängigkeit des Untersuchungsdesigns, allerdings korrelieren die Ergebnisse im Allgemeinen sehr gut miteinander. Zu berücksichtigen sind dabei die Unterschiede in der Aufzeichnung der einzelnen Messparameter. Dabei ist zu beachten, ob die durchschnittliche Leistung oder die momentane Leistung gemessen wird, die aktive Muskelmasse in den jeweiligen Testprotokollen gleich ist, die Kraftentwicklung durch die unteren Extremitäten simultan oder sukzessiv erfolgt und ob die maximale Leistung gleich zu Beginn der Übung gemessen wird oder erst nach einigen Sekunden. Weiterhin sind die Trägheit des verwendeten Messgerätes sowie die verwendeten Körpersegmente bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten. Isometrische und isokinetische Krafttests haben den Vorteil eine Schätzung der Aktivierung der Kraft- und Geschwindigkeitskomponenten vorzunehmen, was bei Treppenstufentest, vertikalen Sprungtests, dem Wingate-Anaerobic-Test sowie langandauernden Radergometer-Protokollen nicht möglich ist.

Testverfahren zur Bestimmung der maximalen anaeroben Kapazität sind unterteilt in maximale Sauerstoffschuld-Tests, Ergometer-Tests (All-Out-Test oder konstante Belastungstests), Messungen des Sauerstoffdefizites während einer konstanten Belastung sowie Messungen der maximalen Laktatkonzentration. Die Bestimmung der maximalen Sauerstoffschuld ist allerdings nicht valide und reliabel genug, um es als anaeroben Kapazitätstest anwenden zu können. Der Anteil des aeroben Stoffwechsels während eines anaeroben Kapazitätstests sowie die Unbekanntheit der mechanischen Effizienz limitieren die Validität der ergometrischen Testverfahren, welche ausschließlich auf der Messung der geleisteten Arbeit basieren. Der Umfang der geleisteten Arbeit während eines Wingate-Anaerobic-Tests hängt von der glykolytischen und aeroben Leistung ab, ebenso wie von der anaeroben Kapazität. Der Leistungsabfall bei sogenannten All-Out-Tests ist nicht reliabel und wird von der aeroben Leistung sowie dem schnellen Muskelfaseranteil (fast-twitch-Fasern) beeinflusst. Grundlegend kann festgehalten werden, dass die Wahl des

Testprotokolls zur Bestimmung der anaeroben Kapazität von der Zielstellung und der Praktikabilität abhängt (Vandewalle et al., 1987).

Der in der vorliegenden Studie verwendete Wingate Anaerobic Test (WAnT) ist in den frühen 1970er Jahren auf Basis des Cumming's Test in der Abteilung für Forschung und Sportmedizin am Wingate Institut in Israel entwickelt worden, um die anaerobe Leistung sowie anaerobe Kapazität zuverlässig messen zu können und die Reaktion des Organismus auf supramaximale Belastungen zu untersuchen. Dabei entwickelte sich das Messinstrument zu einem der anerkanntesten Labor-Fitnesstests (Vandewalle et al., 1987) sowie zu einem bedeutenden Messverfahren zur Beurteilung der Muskelkraft, der muskulären Ausdauer und der Ermüdung (Lovell et al., 2011). Über die Jahre kam es bei der Testdurchführung zu gewissen Modifikationen, um verschiedene Leistungseigenschaften zu bestimmen und den Test für die entsprechenden Anwendergruppen geeignet zu machen. Weiterhin bot der WAnT die Grundlage für die Entwicklung neuerer Testverfahren ähnlicher Art sowie dem laufbasierten Sprint-Intervall-Test (Nummela et al., 1996; Tossavainen et al., 1996). Üblicherweise wird der Test auf dem Radergometer durchgeführt, wobei das Testprotokoll auch an einem Handkurbel-Ergometer absolviert werden kann. Dabei zeigt sich, dass vor allem die Muskelkraft der unteren Extremitäten einen wichtigen Einfluss auf die erzielte maximale Leistung sowie durchschnittliche Leistung während des WAnT auf dem Radergometer aufweist. Der Einfluss der Oberkörperkraft auf anaerobe Leistungen beim Handkurbel-Ergometer während eines WAnT ist daher bisher noch nicht ausreichend erforscht worden (Arslan, 2005). Anhand einer Vielzahl von wissenschaftlichen Studien erwies sich das Testverfahren auf dem Radergometer als Messinstrument mit einer hohen Validität und Reliabilität (Bar-Or, 1987). Je nach Zielstellung und Anwendungsfeld variiert die Testdurchführung in Länge, Wiederholungsanzahl sowie Tretwiderstand und Belastung. Üblicherweise beträgt die Testdauer für den WAnT 30 Sekunden. Um den Anteil an dem Laktaziden und Alaktaziden anaeroben Energiestoffwechsel zu erhöhen, haben einige Wissenschaftler die Testdauer in Studien auf 60 oder sogar 120 Sekunden erweitert (Katch et al., 1977; Lericollais et al., 2011). Auch in der Testwiederholung gibt es je nach Zielstellung Unterschiede. In der Regel wird der WAnT einmal pro Untersuchungstag absolviert. Allerdings wurden in verschiedenen wissenschaftlichen Studien die Wirksamkeit einer wiederholten Ausführung zum Trainingszweck sowie die Auswirkungen auf ausgewählte physiologische Parameter untersucht. Dabei kam der WAnT vier-, fünf- oder teilweise sechsmal zur Anwendung (Greer et al., 1998; Hazell et al., 2010). Auch beim Tretwiderstand sind verschiedene Variationen der Testdurchführung möglich. Ursprünglich ist der Workload auf 7,5 % des Körpergewichtes beziehungsweise 0,075 kg pro Kilogramm Körpergewicht des Sportlers festgelegt worden (Ayalon et al., 1974). Dieser Tretwiderstand ist basierend auf Jugendliche konzipiert worden und nicht für Erwachsene oder sportliche Personen. Um das Testverfahren für die jeweilige Personengruppe repräsentativer zu gestalten, sind im Laufe der Jahre Anpassungen am Tretwiderstand vorgenommen worden. Katch et. al (1977) verwendete beispielsweise einen

Workload von 5,3 %, 6,7 % und 8,0 % des Körpergewichtes, währenddessen einige Studien sogar bis 9,8 % des Körpergewichtes als Tretwiderstand genutzt haben (Evans & Quinney, 1981). Zur Einordnung der erbrachten maximalen sowie durchschnittlichen Leistungen während des 30-sekündigen WAnT haben Maud & Schultz (1989) eine Normwerttabelle für die absoluten und auf das Körpergewicht relativierten Tretleistungen in Watt erstellt (s. Tab. 8 und Tab. 9). Somit lässt sich eine Klassifizierung der Leistungen in Perzentile für männliche und weibliche Sportler vornehmen.

Tab. 8. Normwerte für die maximale Leistung (in Watt) beim Wingate Anaerobic Test (nach Maud & Schultz, 1989)

Perzentil	Watt		Watt/kg	
	männlich	weiblich	männlich	weiblich
90	821,8	560,0	10,89	9,02
80	776,6	526,6	10,39	8,83
70	757,1	505,0	10,20	8,53
60	720,8	479,5	9,80	8,14
50	689,4	449,1	9,22	7,65
40	670,8	432,5	8,92	6,96
30	656,1	399,1	8,53	6,86
20	617,8	375,6	8,24	6,57
10	569,8	353,0	7,06	5,98

Tab. 9. Normwerte für die durchschnittliche Leistung (in Watt) beim Wingate Anaerobic Test (nach Maud & Schultz, 1989)

Perzentil	Watt		Watt/kg	
	männlich	weiblich	männlich	weiblich
90	661,8	469,9	8,24	7,31
80	617,9	419,4	8,01	6,95
70	600,0	409,7	7,91	6,77
60	576,8	391,4	7,59	6,59
50	564,6	381,1	7,44	6,39
40	547,6	366,9	7,14	6,15
30	529,7	353,2	7,00	6,03
20	496,1	336,5	6,59	5,71
10	470,9	306,1	5,98	5,25

Anhand der Normwerttabelle wird ersichtlich, dass Männer in der Lage sind höhere absolute Leistungen sowie höhere auf das Körpergewicht bezogene Leistungen innerhalb des WAnT zu erbringen. Vor allem die Geschlechtsunterschiede bei kurzzeitig erbrachten maximalen Leistungen der unteren Extremitäten ist in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Studien nachgewiesen worden (Weber et al., 2006; Zupan et al., 2009). Auch die Studie von Ben-Ari et al. (1978) berichtete über Geschlechtsunterschiede bei Erwachsenen in der maximalen als auch

durchschnittlichen Leistung bei dem WAnT sowohl auf dem Radergometer als auch auf dem Handkurbel-Ergometer. Dabei konnte gezeigt werden, dass Männer signifikant höhere maximale Leistungen als auch durchschnittliche Leistungen in den oberen und unteren Extremitäten erbringen konnten als weibliche Erwachsene. Die herausgefundenen Unterschiede hatten bei der Skalierung der Leistungen auf das Körpergewicht ebenfalls Bestand. Dabei sind unter anderem der Einfluss des Muskelgewebes, hormonelle und enzymatische Divergenzen sowie neurologische Faktoren als mögliche Mechanismen für die Leistungsdifferenzen ermittelt worden (Esbjörnsson et al., 1993; Esbjörnsson-Liljedahl et al., 1999).

## *2.5 Hochintensives Intervalltraining*

### *2.5.1 Definition und Anwendungsgebiete*

Dem hochintensiven Intervalltraining (HIIT) ist in den vergangenen Jahren, sowohl im Leistungs- als auch Breitensport, eine immer weiter steigende Bedeutung zugekommen. Seit geraumer Zeit wird das HIIT als die „neue“ Trainingsmethode zur Verbesserung der submaximalen und maximalen Ausdauerleistungsfähigkeit im Breiten- und Leistungssport sowie im klinischen Bereich angewendet (Buchheit & Laursen, 2013b; Laursen & Jenkins, 2002; Wahl et al., 2010). Dabei ergaben bereits wissenschaftliche Studien in den 1950er Jahren positive Anpassungseffekte eines intensiven Intervalltrainings auf das Herz-Kreislauf-System (Reindell & Roskamm, 1959). Das hochintensive Intervalltraining (engl. high-intensity intervall training) ist gekennzeichnet „durch alternierende [...] Wechsel zwischen nahezu maximalen und supramaximalen Übungsphasen von kurzer Dauer zwischen zehn Sekunden und vier Minuten, unterbrochen von passiven oder aktiven Entlastungsphasen geringer Intensität“ (Schmitz et al., 2020). Die Erholungsphasen dienen dabei einer teilweisen, aber keiner vollständigen Wiederherstellung. Im Gegensatz zum submaximalen Ausdauertraining, welches durch eine lange und kontinuierliche Belastung gekennzeichnet ist, zeichnet sich das HIIT durch Intervalle aus. Dabei ist das HIIT durch relative kurze, intermittierende Belastungen im submaximalen bis maximalen Bereich charakterisiert (Laursen & Jenkins, 2002). Vor allem in Sportarten in denen der aerobe Energiestoffwechsel dominiert ist (Radsport, Langstreckenlauf) sowie Mannschaftssportarten und dem leichtathletischen Sprint, welche durch anaerobe Stoffwechselprozesse geprägt sind, ist es ein anerkanntes Trainingsmittel zur Wettkampfvorbereitung. Hierbei sollen durch eine hohe Zeiteffizienz eine Verbesserung der kardiorespiratorischen und metabolischen Funktion sowie eine daraus resultierende körperliche Leistungssteigerung des Sportlers erzielt werden. Die Belastungsgestaltung variiert dabei in der Intensität, der Intervallanzahl sowie der Intensität und Anzahl der Pausen. Zusätzlich müssen die Belastungsnormative an die Phase der Periodisierung, den Leistungsstand sowie die individuelle Antwort des Athleten angepasst werden. Eine Vielzahl an wissenschaftlichen Studien hat



dabei gezeigt, dass es zu einer Verbesserung der aeroben sowie anaeroben Kapazität bei gleichzeitig hoher Zeiteffizienz kommt. Der Vorteil dieser Trainingsmethode ist dabei, dass in nur kurzer Trainingszeit gleiche oder teils stärkere Effekte auf die aerobe und anaerobe Kapazität im Vergleich zu einem klassischen Ausdauertraining erzielt werden können (Buchheit & Laursen, 2013b; Weston et al., 2014). Wie bereits erwähnt nutzen insbesondere Sportsportarten, wie Fußball, Handball oder Basketball diese Trainingsmethode in der Vorbereitungs- und Wettkampfphase vermehrt. Die Belastungsstruktur dieser Sportsportarten ist gekennzeichnet durch immer wiederkehrende kurze Belastungen, wie Sprints, schnelle Richtungswechsel oder Zweikämpfe, gefolgt von kurzen Erholungsphasen. Somit hängt die Spielleistung zum Teil auch von der Fähigkeit des Sportlers ab, intermittierende Leistungen zu erbringen und sich schnell wieder von diesen Belastungen zu erholen (Bangsbo et al., 2008; Krstrup et al., 2003). Aber auch im Ausdauerleistungssport, wie in den Laufdisziplinen der Leichtathletik (Mittel- und Langstrecke), dem Schwimmen, im Radsport oder Triathlon ist HIIT ein wichtiger Trainingsbestandteil. Weitere Anwendung findet das hochintensive Intervalltraining im Nachwuchsleistungssport (Engel & Sperlich, 2014), bei freizeitsportlich aktiven Erwachsenen sowie im Rehabilitations- und Präventionssport mit Erwachsenen und Kindern (Gibala, 2007) und bei untrainierten Senioren (Amundsen et al., 2008). Positive Effekte konnten dabei nicht nur bei erwachsenen Personen festgestellt werden, sondern auch bei Kindern und Jugendlichen. Dabei zeigte sich eine verbesserte Sauerstoffaufnahme sowie die Verbesserung der Sprung- und Springkraft (Engel & Sperlich, 2014), ebenso wie positive Effekte auf das Selbstbewusstsein (Meßler et al., 2018), kardiovaskuläre Risikofaktoren (Racil et al., 2016) und die Körperzusammensetzung (Corte de Araujo et al., 2012).

### *2.5.2 Trainingsmethodik und Zielstellung*

Je nach Anwendungsgebiet, Sportart und Leistungsstand muss die Entwicklung der Ausdauer systematisch, zielgerichtet und langfristig ausgelegt sein. Dabei ist eine adressaten-, trainingszielspezifische und dynamische Wichtung und Proportionierung der Trainings- beziehungsweise Intensitätsbereiche sowie der Trainingsmethoden notwendig. Während im Freizeit- und Gesundheitssport überwiegend die Dauermethode bei moderaten und mittleren Belastungsintensitäten zum Einsatz kommt, wird im Fitnesssport das Ausdauertraining bereits differenzierter gesteuert. Hierbei werden neben der Dauermethode auch die Intervall- und Fahrtspielmethode angewendet. Vor allem im Leistungs- und Hochleistungsbereich ist eine hochausdifferenzierte Nutzung verschiedener Intensitätsbereiche unabdingbar. Für die optimale Ausbildung der wettkampfspezifischen Ausdauer ist eine trainingsmethodische Struktur notwendig (s. Abb. 1). Die Höhe des Volumens einzelner Trainingsmethoden ist dabei sehr sportartspezifisch, abhängig von den Leistungsvoraussetzungen der Sportler, der Trainingsziele und der

Trainingsperiodisierung und -zyklisierung (Vgl. Hottenrott & Seidel, 2017). Auch die Leistungsstruktur der jeweiligen Sportart hat einen großen Einfluss auf die Wichtung der Trainingsmethoden. Je höher das Trainingsniveau der einzelnen Sportler ist, umso schwieriger ist es die richtigen Anteile für das Training der einzelnen Fähigkeiten festzulegen.

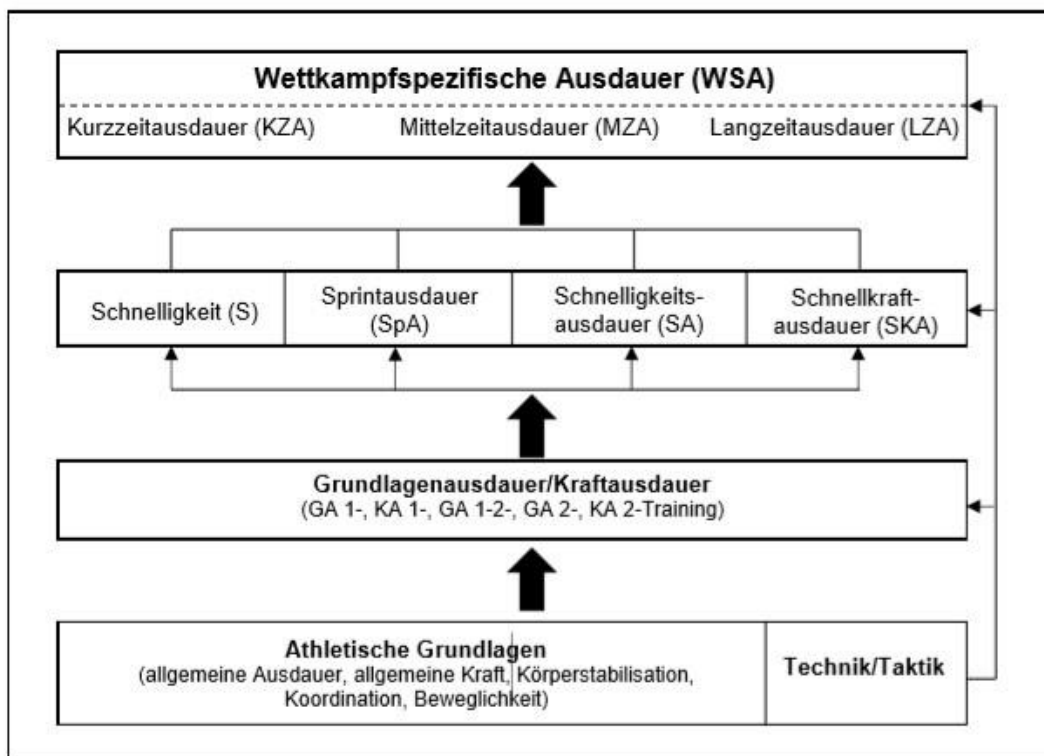


Abb. 1. Trainingsmethodische Struktur zur Entwicklung und Ausprägung der wettkampfspezifischen Ausdauer im Leistungssport (Hottenrott & Seidel, 2017, S. 163)

Aufgrund dessen, dass in vielen Sportarten die Trainingsumfänge nicht weiter gesteigert werden können sowie eine Steigerung des Belastungsumfanges im submaximalen Bereich zu keiner nennenswerten Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit mehr führt, nimmt daher das hochintensive Intervalltraining eine große Bedeutung vor allem im Hoch-/Leistungssport sowie im ambitionierten Breitensport ein. Verglichen mit dem klassischen High-Volume Training (HVT), welches grundsätzlich im Grundlagenausdauer-Bereich 1 (GA1) anzusiedeln ist, fällt das HIIT in den Bereich des wettkampfspezifischen Ausdauertrainings (WSA) (Vgl. Hottenrott & Seidel, 2017, S. 161 f.). Anteilig wird in den Ausdauersportarten im Spitzensport das Training nur zu 10 bis 20 % im Bereich der wettkampfspezifischen Ausdauer vorgenommen und davon teils weniger als 4 % im hochintensiven Bereich (Neumann et al., 2013). Im Hoch-/Leistungssport der Ausdauersportarten wird das HIIT häufig nur in sogenannten Schock-Mikrozyklen, über einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen absolviert. Dabei führen die Sportler zwischen zwei

Grundlagenausdauer-Blöcken an 11 Tagen 15 hochintensive Intervalltrainingseinheiten mit einer Dauer von ungefähr 40 Minuten durch. Die Belastungslänge beträgt dabei 15 Sekunden bei 100 % der maximalen Leistung (Kurzzeitbelastungen) sowie Intervallbelastungen von vier Minuten bei 90 bis 95 % der maximalen Herzfrequenz (Hegner, 2015). Hierbei handelt es sich also um ein großes Entwicklungsfeld, was die Optimierung der Trainingsproportionierung anbelangt. Denn eine Vielzahl an wissenschaftlichen Studien konnte zeigen, dass die Ausdauerleistungsfähigkeit mittel- und langfristig durch ein HIIT gesteigert werden kann. Die Belastungsnormative, wie Umfang, Intensität, Häufigkeit und Dauer sind dabei stark von der Sportart und Sportdisziplin unter Berücksichtigung der jeweiligen Leistungsstruktur abhängig. In der Literatur sind die Angaben zu Intensitäten, Dauer und Häufigkeit eines hochintensiven Intervalltrainings sehr unterschiedlich und eher uneinheitlich dargestellt. Meist wird dabei von maximalen beziehungsweise supramaximalen (> 100%) Intensitäten gesprochen oder von All-Out-Belastungen im Intervallprinzip. Die Steuerung erfolgt dabei über die Laufgeschwindigkeit, Leistung, maximale Sauerstoffaufnahme oder Herzfrequenz (Buchheit & Laursen, 2013b). Für gut trainierte Ausdauersportler wird ein Belastungsreiz im Bereich von 90 bis 100 % der maximalen Sauerstoffaufnahme empfohlen (Laursen & Jenkins, 2002). Bei kontinuierlicher Arbeit sind solche hohen Intensitäten allerdings über einen längeren Zeitraum nicht aufrechtzuerhalten und limitieren daher die Trainingszeit bei diesen hohen Belastungen für jede einzelne Trainingseinheit (Rønnestad et al., 2015). Ein HIIT kann in längere Arbeitsintervalle, mit einer Belastungslänge von drei bis fünf Minuten bei hoher Trainingsintensität sowie in kurze Arbeitsintervalle von 30 bis 45 Sekunden Belastung bei noch höherer Trainingsintensität als bei langen Intervallen unterteilt werden (Tschakert & Hofmann, 2013). Grundlegend lässt sich festhalten, dass die Anzahl und die Dauer der Intervalle sowie die Pausenlänge stark von der Zielstellung des Trainings, der Zielgruppe sowie der Sportart abhängen. Dabei kann die Dauer der einzelnen Intervalle zwischen 6 Sekunden und teils auch acht Minuten variieren. Auch die Pausengestaltung zwischen den einzelnen Intervallbelastungen ist sehr unterschiedlich dargestellt und kann dabei zwischen 45 Sekunden und acht Minuten aktiver oder passiver Entlastungsphase ausfallen. Häufig findet allerdings bei gut ausdauertrainierten Sportlern das Belastungs-Pausenverhältnis von 2:1 oder 1:1 in der Praxis seine Anwendung (Rozenek et al., 2007). Für untrainierte Personen lässt sich häufig das Trainingsprotokoll von vier bis sechs Intervallen mit einer Belastungslänge von 30 Sekunden sowie einer aktiven Pausenzeit von drei bis vier Minuten in der Literatur finden (Gibala & Little, 2010). Für trainierte Sportler wird häufig eine Verkürzung der Intervalllänge und Pausenzeit sowie einer Erhöhung der Intervallhäufigkeit vorgenommen. Ein typisches Belastungsprotokoll mit 15 bis 20 Intervallen über jeweils 15 Sekunden Dauer und einer Pausenlänge von 15 Sekunden aktiver Erholungsphase spiegelt das wieder. Ein etwas längeres Trainingsprogramm für trainierte Sportler erstreckt sich über 10 bis 12 Intervalle mit einer Dauer von jeweils 30 Sekunden, einer Pausenlänge von 30 Sekunden bis hin

zu Intervallen von 4 mal 4 Minuten Intervalle mit einer 4-minütigen Entlastungsphase zwischen den einzelnen Belastungen (Helgerud et al., 2007). Die Zielstellung eines HIIT ist ein wiederholtes Provozieren von starken Stresssituationen für die involvierten physiologischen Systeme, die von höherer Intensität sind als die durchschnittliche Intensität im Zielwettkampf (Laurson & Jenkins, 2002). Die Studie von Rønnestad et al. (2015) untersuchte unter anderem inwiefern sich die Länge der Intervalle auf die Effekte eines 10-wöchigen Trainings auswirkt. Das Probandenkollektiv wurde in zwei Gruppen geteilt. Eine Gruppe führte auf dem Radergometer ein Kurzintervalltraining durch (drei 9,5 Minuten-Serien von 30 Sekunden Belastung, 15 Sekunden aktiver Regeneration und einer Serienpause von 3 Minuten), währenddessen das andere Kollektiv ein Langintervalltraining (4 mal 5 Minuten Belastung mit einer aktiven Pausenzeit von jeweils 2,5 Minuten) absolvierte. Dabei erreichte die Gruppe, welche das Training mit den kurzen Intervallen durchführte eine signifikant größere Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme als das Probandenkollektiv mit dem Langintervalltraining. Zugleich ergab das Training der Kurzintervall-Gruppe eine deutlichere Steigerung in den gemessenen Parametern wie der maximalen und durchschnittlichen Leistung über einen 30-sekündigen All-Out-Test, einer 5-minütigen und 40-minütigen Ausbelastung sowie eine tendenzielle höhere Leistungssteigerung bei 4 mmol/l Laktatkonzentration im Vergleich zu den Leistungen der Gruppe mit dem Langintervall-Training. Daraus schlussfolgerten die Autoren, dass ein Kurzintervall-Training zu höheren Trainingsanpassungen bei der Radfahrleistung sowohl im Hochleistungs- als auch Breitensportbereich führt. Ein kürzerer Belastungsstimulus und kürzere Pausenzeiten führen zu einem größeren Reiz auf das Herz-Kreislauf-System sowie auf die mitochondriale Biogenese, was wiederum einen höheren Anpassungseffekt zur Folge hat. Als einer der Hauptmechanismen eines HIIT auf die Ausdauerleistung wird eine erhöhte Laktatexposition vermutet, was zugleich zu einer erhöhten mitochondrialen Biogenese sowie zu einer vermehrten Ausschüttung des Laktattransporters (Monocarboxyllattransporter) führt (Brooks, 2009). Allerdings führt eine Verkürzung der Pausenzeiten auch zu einer Verringerung der Intensitäten innerhalb der Belastungsphasen (Rønnestad et al., 2015). Die Wirkungsmechanismen auf denen ein HIIT beruht sind zum einen ein Wechsel zwischen Be- und Entlastung, sodass eine längere Trainingszeit bei einem höheren prozentualen Anteil der  $VO_{2max}$  möglich ist und zum anderen, dass eine geringere Akkumulation der limitierenden Stoffwechselprodukte erfolgt. Zusätzlich soll ein stärkerer physiologischer Reiz zu einer größeren Adaptation führen. Trotz des Existierens von zahlreichen unterschiedlichen HIIT-Protokollen findet lediglich eine Differenzierung bezüglich des Leistungsstandes statt, aber eine alters- und geschlechtsspezifische Anpassung des Trainings findet kaum Beachtung. Und dies, obwohl aufgrund der physiologischen und anthropometrischen Unterschiede zwischen Männern und Frauen die Trainingsreaktion signifikant beeinflusst werden kann (Gibala et al., 2014; Schmitz et al., 2020).

### 2.5.3 Auswirkungen eines HIIT auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

Bezüglich der Auswirkungen und Effekte eines hochintensiven Intervalltrainings auf die Ausdauerleistungsfähigkeit gibt es aktuell für viele Anwendungsbereiche, Individual- und Mannschaftssportarten, vom Kindes- und Jugendalter bis hin zu Senioren sowie zu unterschiedlichen Leistungsständen eine große Vielfalt an wissenschaftlichen Studien. Dabei zeigen grundsätzlich die wissenschaftlichen Erkenntnisse, dass das HIIT eine deutlichere Steigerung der maximalen Sauerstoffaufnahme erzielt, im Gegensatz zu einem herkömmlichen Ausdauertraining (Tjønnå et al., 2008). Weiterhin widerlegen bereits frühe wissenschaftliche Studien, die allgemeine Annahme, dass schlecht ausdauertrainierte Personen ( $VO_{2max} < 45$  ml/min/kg) und Freizeitsportler ( $VO_{2max}$  zwischen 45 und 55 ml/min/kg) mehrere Jahre Training benötigen, um das Leistungsniveau von hochtrainierten Athleten ( $VO_{2max} > 60$  ml/min/kg) zu erreichen (Ekblom, 1968). Hickson et al. (1977) konnten bereits bei einem intensiven Trainingsprogramm von zehn Wochen eine deutliche Steigerung der  $VO_{2max}$  erreichen. Während des Studiendesigns führten die Probanden wöchentlich an sechs Tagen abwechselnd ein 40-minütiges Intervalltraining auf dem Radergometer beziehungsweise ein Intervall-Lauf-Training an der maximalen Sauerstoffaufnahme durch. Einige der Probanden wiesen nach der Interventionsphase eine  $VO_{2max}$  von 60 ml/min/kg oder mehr auf. Somit konnte bereits damals gezeigt werden, dass durch ein hochintensives Intervalltraining in kurzer Zeit eine deutliche Verbesserung der aeroben Fitness erzielt werden kann. Die Zeitspanne in der sich evidente Leistungsverbesserungen und Anpassungserscheinungen durch HIIT erzielen lassen ist ebenfalls kürzer im Vergleich zum klassischen Grundlagenausdauertraining (Gibala & McGee, 2008).

In verschiedenen Interventionsstudien werden in durchschnittlich zwei bis neun Wochen einerseits zelluläre und molekulare Anpassungserscheinungen (Vergrößerung der Muskelglykogenspeicher, Verbesserung der Insulinsensitivität und Erhöhung der Aktivität oxidativer Enzyme) beobachtet und zum anderen signifikante Verbesserungen im aeroben Bereich (Verbesserung Sauerstoffaufnahme) als auch im anaeroben Bereich (Verbesserung der Sprint- und Sprungleistung) erzielt.

Der Übersichtsartikel von Wahl et al. (2010) zeigt anhand unterschiedlicher Studien mit leistungsstarken Radsportlern und Läufern, dass ein HIIT über drei bis zehn Wochen zu teils starken Effekten führt. So konnten bei unterschiedlichen Interventionszeiträumen und HIIT-Protokollen Verbesserungen in der Sauerstoffaufnahme und Leistung beziehungsweise der Laufgeschwindigkeit an der individuellen anaeroben Schwelle aufgezeigt werden. Weiterhin zeigte sich, dass bei untrainierten Probandengruppen das HIIT eher dazu geeignet ist die maximale Sauerstoffaufnahme zu steigern, als moderate Ausdauerläufe (Nybo et al., 2010).

Weiterhin konnten Costigan et al. (2015) zeigen, dass ein hochintensives Intervalltraining eine günstigere Beeinflussung des BMI sowie des Körperfettanteils nach sich zieht. Zusätzlich zeigt ein HIIT stärkere Effekte auf die Herz-Kreislauf-

Gesundheit als ein herkömmliches Ausdauertraining (Helgerud et al., 2007). Basierend auf diesen Erkenntnissen findet diese Trainingsmethode auch immer häufiger Anwendung im Rehabilitations- und Präventionssport (Gibala, 2007). Die bisher aufgezeigten wissenschaftlichen Effekte eines HIIT auf die Ausdauerleistungsfähigkeit haben allerdings nicht mit einbezogen, ob geschlechtsspezifische Unterschiede in der Wirkungsweise des Trainings vorherrschen und inwiefern das kalendarische Alter bei Trainingsadaptionen mit einfließt. Schmitz et al. (2020) erstellten hierbei für ihre Studie HIIT-Protokolle mit unterschiedlichen Pausenlängen zwischen den einzelnen Intervallen. Ziel der Untersuchung war es, zu überprüfen, ob die unterschiedlichen HIIT-Protokolle geschlechtsspezifische Effekte auf die Laufgeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsabnahme erzielen. Während der Untersuchung führten die Probanden ein HIIT über vier Wochen mit zwei Trainingseinheiten wöchentlich durch. Dabei absolvierte ein Teilnehmerkollektiv vier 30-sekündige Sprints mit maximaler Geschwindigkeit, jeweils gefolgt mit 180 Sekunden aktiver Pause zwischen den All-Out-Belastungen. Die zweite Probandengruppe führte das gleiche Programm durch, allerdings mit einer verkürzten Pausenzeit von 30 Sekunden zwischen den einzelnen maximalen Läufen. Im Pre-Post-Test-Vergleich erzielten die weiblichen Probanden, welche das HIIT-Protokoll mit kürzeren Regenerationspausen (30 s) absolvierten, eine signifikante Verbesserung in der Geschwindigkeitsabnahme innerhalb der einzelnen Läufe. Weiterhin war bei den weiblichen Probanden ein signifikanter Anstieg der durchschnittlichen Laufgeschwindigkeit feststellbar. Bei dem Testprotokoll mit langen Pausenzeiten (180 s) waren keine statistischen Effekte erkennbar. Innerhalb des Probandenkollektivs der männlichen Probanden, sind diese Unterschiede so nicht ersichtlich geworden. Aus den Ergebnissen schlussfolgerten die Autoren, dass geschlechtsspezifische HIIT-Protokolle in der Trainingspraxis erstellt werden sollten, da die anthropometrischen und physiologischen Unterschiede zwischen beiden Geschlechtern die Trainingsleistungen beeinflussen können. Weitere Studien, unter anderem von Astorino et al. (2011) zeigen, dass Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit durch HIIT erzielt werden konnten, allerdings dass keine geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Anpassung vorliegen. So trat durch die Interventionsphase eine signifikante Zunahme der maximalen Sauerstoffaufnahme und der maximalen/durchschnittlichen Tretleistung während des WAnT sowie eine Abnahme der Herzfrequenz bei submaximaler Belastung ein. Sowohl bei den männlichen als auch weiblichen Probanden waren die Änderungen sehr ähnlich. Daher schlossen die Autoren darauf, dass eine 6-tägige Interventionsphase ähnliche Effekte auf die  $VO_{2max}$  sowie die körperliche Aktivität bei Männern und Frauen erzielt. Macpherson et al. (2011) kamen in ihrer Studie ebenfalls zu dem Ergebnis, dass ein HIIT sowohl bei männlichen als auch weiblichen Probanden zu einer Verbesserung der Körperzusammensetzung, der  $VO_{2max}$  sowie der Laufzeit über 2000 Meter führt. Die Verringerung des Körperfettanteils, der Anstieg der Magermasse sowie die Verbesserung der  $VO_{2max}$  erfolgten nahezu gleichermaßen in beiden

Probandenkollektiven durch die Trainingsintervention. Gibala et al. (2014) stellten in ihrem Reviewartikel fest, dass ein HIIT sowohl bei männlichen als auch weiblichen Probanden zu einer Verbesserung der gesundheitsrelevanten Faktoren, wie der kardiorespiratorischen Fitness führt. Lediglich eine geringe Anzahl an Studien konnten kleine geschlechtsspezifische Unterschiede eines HIIT bezogen auf die Trainingsadaptation feststellen. Metcalfe et al. (2012) wiesen ebenfalls in ihrer Studie nach, dass eine Verbesserung der aeroben Kapazität durch ein HIIT bei beiden Geschlechtern gleichermaßen erreicht werden kann. Unterschiede konnten allerdings in der Insulinsensitivität festgestellt werden. Hierbei erzielten ausschließlich die männlichen Probanden eine Verbesserung durch das 6-wöchige Training.

Inwiefern der Leistungsstand als auch das Alter einen Einfluss auf die Effekte eines HIIT haben, untersuchte Milanović et al. (2015) unter anderem in einem systematischen Review. Dabei fanden die Autoren heraus, dass sowohl herkömmliches Ausdauertraining als auch HIIT, verglichen zu keinem Training, gleichermaßen große Verbesserung in der maximalen Sauerstoffaufnahme erzielen. Bei schlechter ausdauertrainierten Personen führt die Anwendung von herkömmlichem Ausdauertraining kombiniert mit HIIT zu einem zusätzlichen Nutzen innerhalb des Trainingsprozesses. Bei gesunden Erwachsenen, jungen bis mittleren Alters, erzielt ein Intervalltraining mit hohen Intensitäten eine größere Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme als ein herkömmliches Ausdauertraining. Wahl et al. (2010) geben in ihrem Übersichtsartikel an, dass es bereits umfangreiche Ergebnisse bezogen auf die physiologischen Anpassungen eines submaximalen und intensiven Trainings bei untrainierten Personen gibt. Im Bereich des Hochleistungssports ist bisher weniger bekannt, wie Athleten auf solche Trainingsprogramme reagieren. Allerdings geben die Autoren an, dass eine weitere Steigerung der submaximalen Trainingsanteile wahrscheinlich zu keiner weiteren Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit bei hochtrainierten Sportlern führen wird. Daher ist ein HIIT auch in diesem Bereich zu empfehlen, da es ebenfalls bei Hochleistungssportlern zu signifikanten Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit führen kann. In der Studie von Robinson et al. (2017) konnte nachgewiesen werden, dass ein HIIT sowohl bei jungen (18-30 Jahre) als auch alten Probanden (65-80 Jahre) zu einer Verbesserung der kardiorespiratorischen Fitness, der Insulinsensitivität, der mitochondrialen Atmung sowie der fettfreien Masse führt. Allerdings zeigten die jungen Probanden einen stärkeren Anstieg der  $VO_{2max}$  durch das HIIT als die älteren Studienteilnehmer. Aufgrund der dargestellten wissenschaftlichen Ergebnisse diverser Studien scheint ein HIIT annähernd gleichermaßen positive Effekte auf die Ausdauerleistungsfähigkeit sowie die Körperzusammensetzung zu haben, unabhängig von Geschlecht, Leistungsstand und Alter.

### 3 Zielstellung und Arbeitshypothesen

Die umfangreiche theoretische Grundbetrachtung bezüglich der Thematik zeigt eine inkonsistente Sachlage, inwiefern das Geschlecht, das kalendarische Alter sowie die Ausdauerleistungsfähigkeit das Belastungsverhalten und die Erholungskinetik bei kurzzeitigen hochintensiven Intervallbelastungen beeinflussen. Bisherige Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass aufgrund physiologischer und anatomischer Geschlechtsunterschiede ebenfalls Divergenzen in der Trainingsreaktion zwischen Männern und Frauen bestehen und die Erholungsphase nach der Belastung durch verschiedene Prozesse gekennzeichnet sein kann (Hauswirth & Le Meur, 2011). Perez-Gomez et al. (2008) konnten beispielsweise nachweisen, dass Männer im Vergleich zu Frauen eine höhere Sprintleistung bei intermittierenden Belastungen auf dem Radergometer erzielen konnten. Im Gegensatz dazu scheinen Frauen eine höhere Resistenz gegen Ermüdung zu haben (Billaut & Bishop, 2009; Hunter, 2014). Dies könnte geschlechtsspezifische Erholungszeiten während und nach einem HIIT erfordern, um die beabsichtigten Trainingsziele zu erreichen. Derzeit gibt es keine spezifischen Empfehlungen, die sich sowohl in der Belastung als auch der Regeneration von ausdauertrainierten Frauen und Männern bei einem HIIT unterscheiden. Auch ein möglicher Einfluss des kalendarischen Alters und ein damit scheinbar schlechter einhergehendes Belastungs- und Erholungsverhalten bei älteren Sportlern findet bisher keine spezifischen Handlungsempfehlungen bei einem intermittierenden Ausdauertraining (Fell et al., 2008; Fell & Williams, 2008; Hebestreit et al., 1993). Das hat zur Folge, dass sowohl in der Trainingspraxis als auch in der Literatur bei HIIT-Programmen keine individuelle Belastungs- und Regenerationssteuerung, bezogen auf das Geschlecht, das Alter sowie auf die Leistungsfähigkeit erfolgt beziehungsweise vorgegeben wird. Auf Grundlage dieser identifizierten Forschungslücke ergibt sich folgende zentrale Fragestellung, welche mittels dieser wissenschaftlichen Studie bearbeitet werden soll:

Welchen Einfluss haben das Geschlecht, das Alter und die Ausdauerleistungsfähigkeit auf die Belastungs- und die Erholungskinetik nach standardisierten, lokomotorischen Intervallbelastungen und ist auf Grundlage der Erkenntnisse eine geschlechts-, alters- beziehungsweise ausdauerspezifische Belastungs- und Regenerationssteuerung erforderlich? Weiterhin ist zu klären, welche Auswirkungen die Länge der Pausenzeit zwischen den jeweiligen Intervallbelastungen auf das Regenerationsverhalten in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter und Ausdauerleistungsfähigkeit hat.

Vor allem die Länge der Pausenzeiten nach der jeweiligen Belastungsphase sind dabei von wesentlicher Bedeutung bei einem Intervalltraining und ein mitbestimmender Faktor in der Belastungssteuerung und Leistungsentwicklung. Wie schnell die Funktionssysteme des Organismus nach einer Belastung wiederhergestellt werden, hängt dabei unter anderem von den



Belastungsnormativen Intensität, Volumen, Häufigkeit, Dauer und Dichte des Trainingsreizes ab. Weiterhin ist bekannt, dass verschiedene Funktionssysteme unterschiedlich schnell regenerieren. Das Herz-Kreislauf-System und das respiratorische System erholen sich im Vergleich zum funktionellen Bewegungssystem oder verschiedenen Stoff- und Energiewechselprozessen, wie der Glykogen- und Proteinresynthese deutlich schneller (Hottenrott & Neumann, 2010). Darüber hinaus scheinen ebenfalls die Leistungskapazität sowie das kalendarische Alter einen Einfluss auf die Wiederherstellungsprozesse des Organismus zu haben. Eine Vielzahl an wissenschaftlichen Studien konnte zeigen, dass gut trainierte Ausdauersportler schneller regenerieren als untrainierte Personen (Darr et al., 1988; Short & Sedlock, 1997; Tomlin & Wenger, 2001). Allerdings wiesen die Probandengruppen in diesen Untersuchungen einen teils erheblichen Unterschied in der Ausdauerleistungsfähigkeit auf, was die teils großen Diskrepanzen in den Wiederherstellungsprozessen erklären lässt. Wenige Erkenntnisse gibt es derzeit darüber, wie sich das Regenerationsverhalten bei sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Athleten verhält und wie groß der Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf das Regenerationsverhalten bei diesen Probandengruppen ausfällt.

Inwiefern das Geschlecht und das kalendarische Alter einen Einfluss auf das Leistungsvermögen und die Wiederherstellung nach hochintensiven Intervallbelastungen haben wird in der Literatur ebenfalls häufig diskutiert, allerdings finden sich dazu teils widersprüchliche Ergebnisse. Bei Männern zeigt sich eine erhöhte absolute und mittlere Leistungsfähigkeit während intermittierender Belastungen (Perez-Gomez et al., 2008), währenddessen Frauen eine erhöhte Resistenz gegenüber einer Ermüdung aufzuweisen scheinen (Billaut & Bishop, 2009; Hunter, 2014). In weiteren Studien wurden vor allem isometrische Kontraktionen in Bezug auf die Ermüdungsresistenz untersucht. Der Forschungsstand bezüglich der Resistenz gegenüber einer Ermüdung bei dynamischen Kontraktionen ist dahingehend unzureichend. Darüber hinaus liegt der Schwerpunkt vieler Untersuchungen auf der Belastungsphase; die Entlastungs- oder Regenerationsphase zwischen den einzelnen Ausbelastungen und im Anschluss an die hochintensiven Belastungen sind seltener Bestandteil von wissenschaftlichen Studien. Ähnlich wie bei den Untersuchungen von Billaut & Bishop (2009) sowie Hunter (2014) zeigen Frauen bei intermittierenden isometrischen Kontraktionen eine deutlich geringere Ermüdung und können ihre Kraft länger aufrechterhalten (Albert et al., 2006). Gleichzeitig konnte in selbiger Untersuchung, im Gegensatz zu vielen anderen Studien, auch eine höhere relative Kraftleistung der weiblichen Probanden nachgewiesen werden. Ursächlich für diese Erkenntnis könnte das methodische Vorgehen der Studie gewesen sein, da der Trainingsstand der Probanden nicht erfasst wurde und somit auch nicht in die Auswertung eingeflossen ist. Jedoch konnte auch unter Einbezug des kalendarischen Alters und der körperlichen Aktivität eine höhere Ermüdungsresistenz in anderen Studien bei Frauen bestätigt werden (Wüst et al., 2008). Darüber hinaus konnten motivationale Aspekte der

Kraftentwicklung durch elektronisch stimulierte Kontraktionen ausgeschlossen werden. Als einer der Hauptgründe wird die größere Muskelmasse von Männern als Ursache diskutiert. Infolge einer isometrischen Kontraktion scheint der Blutfluss und damit die Versorgung mit Sauerstoff und der Abtransport von Stoffwechselprodukten durch die höhere Muskelmasse bei Männern beeinträchtigt zu sein. Allerdings konnten auch bei dynamischen Kontraktionen eine erhöhte Ermüdungsresistenz bei Frauen nachgewiesen werden (Laurent et al., 2010; Laurent et al., 2014). Zurückgeführt wurde dies, neben den Unterschieden in der Muskelmasse, auf die Verteilung der Muskelfasertypen und der damit zusammenhängenden metabolischen Diskrepanzen. Sowohl die Substratverwertung als auch die Enzymaktivität unterscheiden sich zwischen den Geschlechtern. Auch die hormonellen Differenzen tragen zu den Unterschieden bei (Billaut & Bishop, 2009). Vor allem die differente Ausschüttung der Sexualhormone bei Männern und Frauen ist dabei von großer Bedeutung. Androgene (z.B. Testosteron) erhöhen dabei die Proteinsynthese und führen zu einer Muskelhypertrophie (Ahtiainen et al., 2003; Sinha-Hikim et al., 2006). Die höhere Androgenkonzentration bei Männern trägt dabei zu einer höheren Muskelmasse sowie einer selektiven Hypertrophie der Typ-II-Fasern bei. Im Gegensatz dazu erhöhen Östrogene die Konzentration des Wachstumshormons (GH), was wiederum die Lipolyse stimuliert und die glykogenolytische Aktivität reduziert (Nygaard, 1981). Die höhere Östrogenkonzentration bei Frauen resultiert dabei in einer höheren GH-Freisetzung in Ruhe im Vergleich zu gleichaltrigen Männern (Wideman et al., 1999). Allerdings scheint eine Belastung eine ähnliche inkrementelle GH-Reaktion bei beiden Geschlechtern hervorzurufen (Sandoval & Matt, 2002). Die hormonellen Differenzen scheinen auch die sympathischen Reaktionen auf eine supramaximale Belastung zu beeinflussen, indem Frauen bei gleicher relativer Intensität einen geringeren Plasmakatecholaminspiegel und infolgedessen eine geringere Blutlaktatkonzentration im Vergleich zu Männern mit ähnlichen Fitnesslevel aufweisen (Weber & Schneider, 2000). Diese Forschungsergebnisse helfen zwar zur ansatzweisen Klärung der Unterschiede während der Intervallbelastungen eines HIIT und versuchen Aufschluss über die Regeneration zu geben, jedoch sind die Intervallpausen bis dato nicht erforscht. Aktuelle Untersuchungen zu der individuellen Steuerung der Pausenlänge eines HIIT geben Hinweise darauf, dass Frauen tendenziell eher von kürzeren Regenerationszeiten profitieren könnten (Schmitz et al., 2020).

Nicht nur das Geschlecht scheint einen Einfluss auf die Belastungs- und die Erholungskinetik nach Intervallebelastungen zu haben, sondern ebenfalls das kalendarische Alter. In Bezug auf das Leistungsvermögen und die Wiederherstellung nach sportlichen Belastungen berichten Altersklassensportler häufig von einer, zumindest subjektiv wahrgenommenen, längeren Regenerationszeit im Gegensatz zu jüngeren Athleten. Generell ist die Forschungslage zu altersabhängigen Veränderungen der Regenerationszeit noch immer unzureichend ausgeprägt, insbesondere bei hochintensiven Intervalltrainingseinheiten. Vereinzelt Studien

zeigen, dass die Trainierbarkeit durch ein HIIT unabhängig vom Alter ist und sich dementsprechend die Verbesserung der  $VO_{2max}$  in den verschiedenen Altersgruppen (20 bis 70+ Jahre) nicht signifikant unterscheidet (Støren et al., 2017). In Bezug auf die Wiederherstellung nach kurzen hochintensiven Intervallbelastungen konnten Hebestreit et al. (1993) eine kürzere Regenerationszeit bei Jungen (9 - 12 Jahre) im Vergleich zu jungen Erwachsenen (19 - 23 Jahre) nachweisen. Die Wissenschaftler untersuchten dabei zwei Probandengruppen von jeweils 8 präpubertäre Jungen und 8 jungen Männern, die eine ähnliche maximale Sauerstoffaufnahme ( $49,6 \pm 6,6$  vs.  $51,1 \pm 6,6$  ml/min/kg) sowie ein Aktivitätsniveau aufwiesen. An drei unterschiedlichen Testtagen führten die Probanden zwei aufeinanderfolgende 30-sekündige WAnTs auf dem Radergometer durch, getrennt durch ein 1-minütiges, 2-minütiges oder 10-minütiges aktives Erholungsintervall. Die Ergebnisse zeigten, dass die Jungen bei allen drei Testprotokollen einen signifikant geringeren Leistungsabfall zwischen dem ersten und zweiten WAnT aufwiesen sowie das respiratorische Austauschverhältnis nach der Ausbelastung bei den Jungen geringer war und sie sich schneller von der hochintensiven Belastung erholten. Die Autoren schlussfolgerten aus den Erkenntnissen, dass eine geringere Abhängigkeit von der Glykolyse während des WAnT bei den Jungen vorliegt, was somit zu einer geringeren Azidose führt. Weiterhin ist vermutet worden, dass die Jungen einen schnelleren Abbau der Metaboliten nach der Belastung aufweisen.

Auf Grundlage der wenigen Studien zeigt sich, dass das kalendarische Alter einen Einfluss auf die Regeneration und Ermüdung nach kurzen hochintensiven Belastungen haben kann und altersbedingte Unterschiede in der Belastungs- und Erholungskinetik nach Intervallbelastungen möglich sind. Als Erklärungsansätze für eine verlangsamte Regeneration und eine erhöhte Ermüdung der älteren Sportler nach Belastungen werden in der Literatur unter anderem eine größere Anfälligkeit für belastungsinduzierte Schädigungen des älteren Muskels sowie verlangsamte Reparatur- und Adaptionsmechanismen im Alter diskutiert (Fell & Williams, 2008). Weitere mögliche Ursachen einer verlängerten Regenerations- und Adaptionsphase nach einer Belastung könnten eine verlangsamte Wiederherstellung der Glykogenspeicher sowie ein zeitlich verzögerter Wiederaufbau der geschädigten Muskulatur sein. Erklärungsansätze, die sich mit einer veränderten Glykogenresynthese beschäftigen, halten einer wissenschaftlichen Prüfung jedoch nicht stand. Ältere Personen weisen zwar schon in Ruhe niedrigere Glykogenreserven auf, welche in Folge bei hoher Belastung eine längere Regenerationszeit benötigen würden, jedoch ist dies primär auf einen inaktiveren Lebensstil zurückzuführen (Cartee, 1994). Die Forschungsergebnisse zum Wiederaufbau der geschädigten Muskulatur sind ebenfalls sehr inkonsistent und zeigten widersprüchliche Ergebnisse (Allman & Rice, 2001; Klein et al., 1988). Beide Erklärungsansätze werden dabei erheblich durch das methodische Vorgehen als auch durch den divergenten Trainingszustand der Probanden beeinflusst. Da in den vorhandenen Studien häufig junge Athleten mit älteren, nicht sehr aktiven Probanden verglichen werden, ist eine klare Einschätzung des Sachverhaltes nicht möglich.

Dennoch deutet der derzeitige Forschungsstand darauf hin, dass altersbedingte Unterschiede in der Reaktion auf einen Belastungsreiz vorhanden sind. Wissenschaftliche Studien anhand junger und alter Athleten mit einem gleichen Aktivitätslevel und Ausdauerleistungsniveau sind dabei sehr begrenzt. Auf dieser methodischen Grundlage befassten sich einige Studien mit der neuromuskulären Ermüdung, welche im Altersverlauf Veränderungen unterliegen könnte. Dennoch scheint sich diese, abgesehen von minimalen altersbedingten Funktionseinbußen trainieren zu lassen (Bieuzen et al., 2010; Easthope et al., 2010). Das kardiorespiratorische System ist vermutlich ebenfalls im Altersverlauf gut trainierbar (Sultana et al., 2012). Weitere Untersuchungen zeigten, dass altersbedingte Unterschiede bei der Regenerationsfähigkeit auf physiologischer Ebene maßgeblich vom Trainingszustand abhängig sind, allerdings das subjektive Belastungsempfinden mit zunehmenden Alter Veränderungen aufweist (Fell et al., 2006, 2008).

Aufgrund der aufgezeigten Divergenzen soll diese wissenschaftliche Studie die inkonsistente Sachlage aufarbeiten und Erkenntnisse für die Trainingswissenschaft in Bezug auf die Belastungs- und Regenerationssteuerung im Bereich des Leistungs-, Breiten- sowie für den Gesundheitssport liefern. Des Weiteren ist für die stetig steigende Anzahl an Altersklassensportlern in den Ausdauersportarten wichtig, dass sowohl die Belastungs- als auch die Erholungszeiten bei intermittierenden Belastungen richtig gewählt werden, um Überforderungen zu vermeiden und gesundheitliche Risiken zu minimieren.

Auf der Grundlage der theoretischen Betrachtung, insbesondere des Einflusses von Geschlecht, Alter und Leistungsfähigkeit auf die Belastungs- und Erholungskinetik nach kurzen hochintensiven Intervallbelastungen sowie der formulierten Zielstellung der wissenschaftlichen Arbeit werden folgende Arbeitshypothesen aufgestellt und anschließend wissenschaftlich untersucht und diskutiert.

- H1 Frauen erreichen bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit im Vergleich zu Männern eine geringere maximale und durchschnittliche Leistung (W/kg) bei lokomotorischen Intervallbelastungen.
- H2 Frauen weisen im Vergleich zu Männern bei lokomotorischen Intervallbelastungen eine bessere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall sowie eine erhöhte Ermüdungsresistenz über das gesamte HIIT-Programm auf.
- H3 Nach den lokomotorischen Intervallbelastungen weisen Frauen bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit eine bessere Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz auf als Männer.

- H4 Nach den lokomotorischen Intervallbelastungen weisen Frauen bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit einen schnelleren Abbau der Laktatkonzentration auf als Männer.
- H5 Sportler mit einer sehr guten Ausdauerleistungsfähigkeit erreichen im Vergleich zu gut Ausdauertrainierten eine höhere maximale und durchschnittliche Leistung (W/kg) bei lokomotorischen Intervallbelastungen.
- H6 Sportler mit einer besseren Ausdauerleistungsfähigkeit weisen bei lokomotorischen Intervallbelastungen eine bessere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall sowie eine erhöhte Ermüdungsresistenz über das gesamte HIIT-Programm auf.
- H7 Nach den lokomotorischen Intervallbelastungen weisen sehr gut ausdauertrainierte Sportler eine bessere Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz, im Vergleich zu gut Ausdauertrainierten auf.
- H8 Nach den lokomotorischen Intervallbelastungen weisen sehr gut ausdauertrainierte Sportler einen schnelleren Abbau der Laktatkonzentration auf als gut Ausdauertrainierte.
- H9 Jüngere Sportler erreichen bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit im Vergleich zu Altersklassensportlern eine höhere maximale und durchschnittliche Leistung (W/kg) bei lokomotorischen Intervallbelastungen.
- H10 Jüngere Sportler weisen im Vergleich zu Altersklassensportlern bei lokomotorischen Intervallbelastungen eine bessere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall sowie eine höhere Ermüdungsresistenz über das gesamte HIIT-Programm auf.
- H11 Nach den lokomotorischen Intervallbelastungen weisen jüngere Sportler bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit eine bessere Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz auf als Altersklassensportler.
- H12 Nach den lokomotorischen Intervallbelastungen weisen jüngere Sportler bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit einen schnelleren Abbau der Laktatkonzentration auf als Altersklassensportler.

## 4 Untersuchungsmethodik

### 4.1 Probandenkollektiv

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden insgesamt 49 Probanden im Alter zwischen 18 und 65 Jahren getestet. Durch den Drop Out eines männlichen Sportlers, welcher aufgrund einer Verletzung das Untersuchungsdesign nicht vollständig abschließen konnte, gingen insgesamt die Datensätze von 48 Probanden in die Auswertung ein. Die Rekrutierung der Probanden erfolgte über das Institut für Sportwissenschaft an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg sowie über die Verbreitung der Studieninformationen an ansässige Triathlon- und Radsportvereine. Als Kontraindikationen für die Teilnahme an der Studie wurden im Vorfeld folgende Punkte festgelegt: Erkrankungen von Herz, Kreislauf oder Lunge mit erheblicher Beeinträchtigung der kardiopulmonalen Funktion. Beispielsweise eine instabile angina pectoris, dekompensierte Herzinsuffizienz, akute Myo- oder Perikarditis, kritische Aortenstenose, schwere hypertrophe obstruktive Kardiomyopathie, unbehandelte maligne Arrhythmien sowie symptomatischer höhergradiger AV-Block. Als weitere Kontraindikationen galten ein unbehandelter schwerer Bluthochdruck, ein schwerer pulmonaler Hochdruck, ein überlebter Herzinfarkt, schwerer arterieller Bluthochdruck und sonstige akute bzw. floride Erkrankungen. Personen mit angeborener oder erworbener Vitien (Herzklappenerkrankungen), Vitien mit Synkopen, AV Block II. und III. Grades, Linksschenkelblock, komplexen ventrikulären Arrhythmien sowie extremen Ernährungsformen (z.B. Veganismus, ketogene Ernährung) konnten ebenfalls nicht an der Studie teilnehmen. Als Einschlusskriterien wurden folgende Punkte festgelegt: Alle Probanden mussten ambitionierte Freizeit- oder Leistungssportler sein, sich in einer Altersspanne von 18 bis 65 Jahren befinden und keine akuten Erkrankungen aufweisen. Zusätzlich durfte keine regelmäßige Einnahme von Medikamenten erfolgen, der BMI  $< 30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  sein und der aktuelle Ausdauertrainingsumfang musste mindestens 5 Stunden pro Woche auf dem Rad betragen. Mehrjährige Radsporterfahrung sowie keine orthopädischen Beeinträchtigungen waren ebenfalls Voraussetzung, um als Proband an der Studie teilnehmen zu können. Mittels eines detaillierten Anamnesebogens (s. Anhang) wurden sämtliche Ausschluss- sowie Einschlusskriterien im Vorfeld abgeklärt. Im Mittel wiesen die 48 in die Studie eingeschlossenen Probanden ein Alter von  $37,73 \pm 13,98$  Jahren auf, einen Body Mass Index (BMI) von  $22,80 \pm 2,82 \text{ kg}/\text{m}^2$  sowie einen Körperfettanteil von  $14,61 \pm 7,5 \%$ . Der durchschnittliche Trainingsumfang pro Woche betrug  $8,56 \pm 3,15$  Stunden, die Probanden erreichten im  $\text{VO}_{2\text{max}}$ -Test eine Sauerstoffaufnahme von mittleren  $48,39 \pm 9,25 \text{ ml}/\text{min}/\text{kg}$  und erzielten dabei im Durchschnitt ein berechnetes Perzentil der  $\text{VO}_{2\text{max}}$  von  $84,71 \pm 17,40$  (Graves et al., 2015). Zum überwiegenden Teil kamen die Probanden aus dem Rad- oder Triathlonsport. Vereinzelt Sportler wurden aus dem Lauf- und Schwimmsport, einer Sportsportart (Fußball) oder dem Turnen rekrutiert, erfüllten allerdings das Einschlusskriterium von mindestens fünf Stunden Ausdauertraining pro Woche auf dem Rad sowie die mehrjährige Radsporterfahrung. Von den insgesamt 48

eingeschlossenen ambitionierten Freizeit- und Leistungssportlern waren 26 Probanden männlich und 22 Probanden weiblich (s. Tab. 10).

Tab. 10. *Anthropometrische Daten und VO<sub>2max</sub>-Werte aller Studienteilnehmer mit Mittelwerten und Standardabweichungen (n = 48)*

	<b>Männlich (n = 26)</b>		<b>Weiblich (n = 22)</b>		p-Werte
	MW	SD	MW	SD	
Größe (m)	1,79	0,06	1,68	0,07	< 0,001
Gewicht (kg)	75,95	7,05	60,02	8,07	< 0,001
Alter (J)	40,85	14,29	34,05	12,96	0,09
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	23,76	2,20	21,65	3,09	0,01
Sport pro Woche (h)	8,42	2,35	8,73	3,95	0,74
KF (%)	12,71	7,67	16,85	6,81	0,06
VO <sub>2max</sub> (ml/min/kg)	52,76	8,52	43,23	7,32	< 0,001
Perzentil VO <sub>2max</sub>	89,45	15,60	79,11	18,09	0,04

#### 4.2 Untersuchungsdesign

Die Studie wurde am Institut für Sportwissenschaft der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Labor Trainingswissenschaft im Zeitraum von Juni 2019 bis Mai 2020 durchgeführt. Dabei hatten die Probanden insgesamt vier Untersuchungstermine zu absolvieren (s. Abb. 2). Zwischen den einzelnen Testtagen lagen mindestens 48 Stunden bzw. eine Woche. Die Zeitspanne für die vier Messtermine sollte im Optimalfall maximal drei bis vier Wochen betragen, um den Einfluss des möglichen fortgeführten Trainings auf die Messergebnisse auf ein Minimum zu beschränken. Vor Beginn der Studie erfolgte die Zusendung der Probandeninformationen per E-Mail an die Teilnehmer. Darin wurden die Sportler über die Zielstellung, den Ablauf sowie die Risiken der Testdurchführung informiert und erhielten datenschutzrechtliche Hinweise. Zugleich erhielten sie eine Einwilligungserklärung, welche die Teilnehmer zum ersten Termin unterschrieben mitbringen mussten beziehungsweise nach Abklärung aufgekommener Fragen mit dem Testleiter vor Ort unterzeichneten. Vor jedem Testtermin erhielten die Probanden die Vorgabe 12 Stunden vor Untersuchungsbeginn keine intensiven körperlichen Belastungen durchzuführen, vier Stunden vor Testdurchführung kein Konsum von Koffein sowie mindestens zwei Stunden vor Start der Untersuchung nur noch kleinere Mahlzeiten zu sich zu nehmen, beziehungsweise nur noch Wasser oder ungesüßten Tee zu trinken. Des Weiteren erhielten die Teilnehmer die Anweisung bei einem akuten oder anstehenden Infekt, beziehungsweise allgemeinem Unwohlsein den vereinbarten Termin zu verschieben. Die Studie wurde in Übereinstimmung der Erklärung von Helsinki durchgeführt und von der Ethikkommission der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Referenznummer: 2019-094) genehmigt.

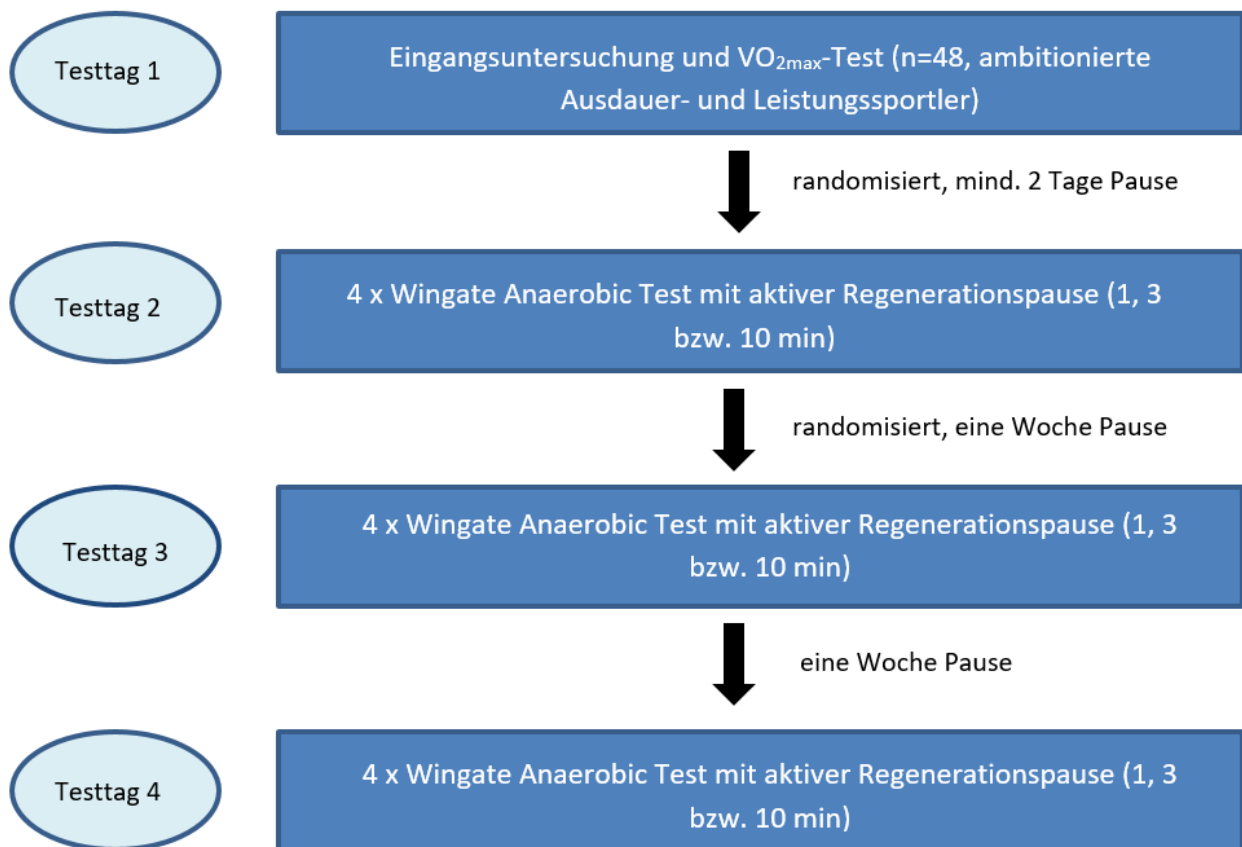


Abb. 2. Darstellung des Studiendesigns

Der Ablauf des ersten Testtages, mit der Eingangsuntersuchung sowie dem  $VO_{2max}$ -Test stellte sich für alle Probanden gleich dar. Der Untersuchungstermin startete mit einer umfassenden mündlichen Erläuterung über den Testablauf, der Abfrage studienrelevanter Informationen wie Alter, Geschlecht, Sportart und Trainingsumfang pro Woche sowie der Erhebung der anthropometrischen Daten. Dabei erfolgte zuerst eine Ermittlung der Körpergröße mittels eines an der Wand angebrachten Maßbandes, eine Bioimpedanzanalyse zur Bestimmung des Körpergewichts, des Körperfettanteils, der fettfreien Masse und des Grundumsatzes via der 4-Punkt-Waage *Tanita BC-545N* (Tanita Europe BV, Niederlande) sowie die Ermittlung des Taillenumfanges. Anschließend hatten die Probanden eine kurze Ruhephase auf der Liege, bevor das Ruhe-EKG geschrieben wurde. Dies erfolgte über den EKG-Verstärker *Vicardio* und der dazugehörigen Software (Version 1.1.0) (getemed AG, Deutschland) mittels einer Extremitäten-Ableitung nach Einthoven. Ein auffälliges EKG hätte zum Ausschluss aus der Studie geführt. Im Anschluss wurde eine Bioimpedanzanalyse liegend, mit Hilfe des *Body Impedance Analyzer* (Data Input GmbH, Deutschland) durchgeführt. Dabei bekam der Proband jeweils zwei Elektroden an Hand und Fuß geklebt (dominante Seite). Über die Hautelektroden wurde ein homogenes elektisches Wechselstromfeld mit konstanter Stromstärke in der Messperson erzeugt und der Gesamtwiderstand (Impedanz) in Ohm gemessen.



Anschließend konnten durch die Software *Nutri 3* (Version 3.0.88) die genauen Messwerte für die Magermasse, des Körperwassers, des Körperfettanteils und des Grundumsatzes für jeden Probanden berechnet werden. Darauffolgend kam es zu der Durchführung eines Orthostatic-Tests. Dabei wurde eine dreiminütige Liegendmessung mit einer anschließenden ebenso langen Stehendmessung durchgeführt. Über das Herzfrequenz-Messgerät *RS800 CX* (Polar Electro, Finnland) ist mittels Sensors und Brustgurt die Herzfrequenz aufgezeichnet worden. Im Anschluss wurden noch die Handkraft sowie die Sprungkraft der Teilnehmer bestimmt. Die Handkraft ist mittels eines Handkraftdynamometers *newgen medicals - PE-3720-919* (PEARL GmbH, Deutschland) jeweils für die rechte und die linke Hand ermittelt worden. Zur Bestimmung der Sprungkraft führten die Sportler einen Counter-Movement-Jump durch. Mit Hilfe des *OptoJump* (Microgate Srl, Italien) wurde anhand der erreichten Flugzeit die Sprunghöhe in Zentimetern errechnet. Mit Beendigung der Eingangsuntersuchung stand für die Probanden der  $VO_{2max}$ -Test mittels spiroergometrischer Untersuchung (Metalyzer 3B, Cortex GmbH, Deutschland) zur Bestimmung der maximalen aeroben Kapazität auf dem Programm. Der Test wurde unter standardisierten Bedingungen (20°C Raumtemperatur und 50 % relative Luftfeuchte) und unter Berücksichtigung ergometrischer Standards durchgeführt. Die Untersuchungsdurchführung erfolgte auf dem Hochleistungs-Fahrradergometer *FES E2000S* (FES e.V., Deutschland) mit Radschuhen und Klickpedalen. Im Vorfeld wurde das Radergometer individuell auf jeden Probanden eingestellt und die Sitzposition vermessen. Somit wurde gewährleistet, dass zu allen Testterminen dieselbe Radeinstellung vorgenommen werden konnte. Anschließend erfolgte die Ruhemessung der Ventilation (Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe, respiratorischer Quotient), der Laktat- und Glukosekonzentration (in mmol/l) sowie der Herzfrequenz (in S/min). Zur Bestimmung der Laktat- und Glukosekonzentrationen wurde dem Probanden kapilläres Blut aus dem Ohrläppchen entnommen. Mittels des Analysegerätes *SUPER GL ambulance* (Dr. Müller Gerätebau GmbH, Deutschland) sind die Werte anschließend ausgelesen worden. Für die Aufzeichnung der Herzfrequenz ist, wie bereits bei der Eingangsuntersuchung das Herzfrequenz-Messgerät *RS800 CX* (Polar Electro, Finnland) mit Brustgurt verwendet worden. Nach einer dreiminütigen passiven Phase zur Ermittlung der Ruhewerte erfolgte die achtminütige Erwärmung auf dem Radergometer bei 70 Watt (Frauen) beziehungsweise 100 Watt (Männer). Nach der Einfahrphase absolvierten die Sportler den  $VO_{2max}$ -Test. Dabei starteten alle Probanden mit einem Widerstand von 70 Watt. Minütlich wurde die Leistung um 30 Watt gesteigert. Die Trittfrequenz ist auf 80 bis 100 Umdrehungen pro Minute festgesetzt worden. Während des kompletten Testablaufes wurden die Herzfrequenz sowie die Sauerstoffaufnahme, die Kohlendioxidabgabe und der respiratorische Quotient mittels der Spiroergometrie (breath-by-breath-Messung) aufgezeichnet und anhand der Software *MetaSoft Studio* (Version 4.7.1.) ausgegeben. Im Rhythmus von zwei Stufen wurde dem Probanden kapilläres Blut zur Laktat- und

Glukosebestimmung entnommen. Ein Abbruch der Belastung erfolgte, wenn mindestens drei der folgenden Kriterien erfüllt waren:

1. ein respiratorischer Quotient über 1,10
2. die Trittfrequenz von mindestens 80 Umdrehungen pro Minute konnte nicht mehr eingehalten werden
3. subjektive Bewertung der wahrgenommenen Anstrengung von  $\geq 18$  auf der RPE-Skala
4. Plateaubildung der Sauerstoffaufnahme

Nach Abbruch des  $VO_{2max}$ -Tests folgte eine dreiminütige Cool-Down-Phase bei 70 Watt (Frauen) beziehungsweise 100 Watt (Männer).

Zum Abschluss führte der Proband zwei maximale Antrittstests über jeweils 5 Sekunden sowie einen WAnT über 30 Sekunden zur Eingewöhnung und Vorbereitung auf die WAnTs an den folgenden Testtagen durch. Die Bremsleistung orientierte sich dabei an der maximalen Tretleistung des vorangegangenen  $VO_{2max}$ -Tests und nicht wie üblich beim WAnT anhand des Körpergewichtes. So ist gewährleistet worden, dass jeder Proband abhängig von der individuellen Leistungsfähigkeit belastet wurde. Die zwei 5-sekündigen Antrittstests dienten dazu, die Explosivkraft der Probanden (in Watt) zu bestimmen.

Nach mindestens zwei Tagen Pause erfolgten dann die wöchentlich durchgeführten Testtage zwei bis vier (s. Abb. 3). An diesen Untersuchungsterminen wurden die WAnTs mit unterschiedlichen aktiven Regenerationszeiten (1, 3 oder 10 Minuten) absolviert. Es erfolgte eine randomisierte Zuteilung der Pausenzeit zwischen den einzelnen 30-sekündigen All-Out-Tests. Der WAnT wurde als Messmethode gewählt, da er, wie bereits in Kapitel 2.4 dargestellt in Bezug auf die Ermittlung der Muskelkraft und Erholung eine sehr hohe Test-Retest-Reliabilität und Reproduzierbarkeit aufweist (Bar-Or, 1987; Naughton et al., 1992; Patton et al., 1985). Die Testdurchführung für die Messtage zwei bis vier stellte sich dabei wie folgt dar.

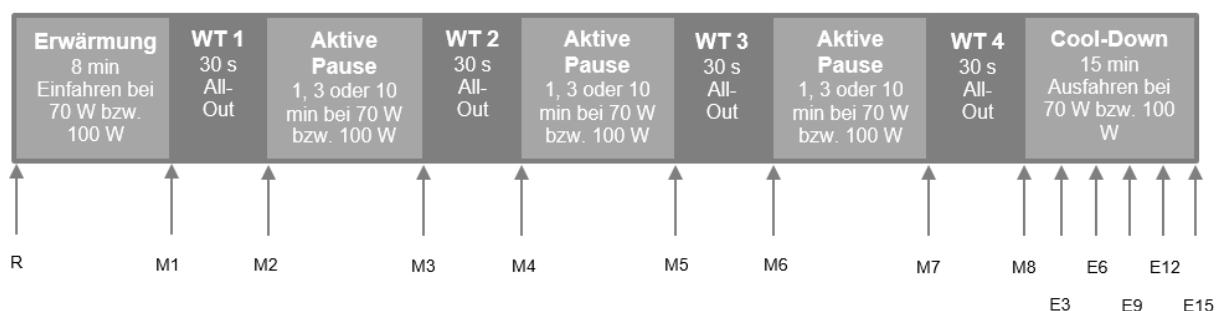


Abb. 3. Testdurchführung WAnT mit Messzeitpunkten (zweiter bis vierter Messtag)

Bevor das Testprotokoll auf dem Radergometer begann, wurde zu jedem Testtermin eine weitere Bioimpedanzmessung mit Hilfe einer 4-Punkt-Waage durchgeführt.

Anschließend sind die Spirometrie und der Brustgurt angelegt worden. Zusätzlich bekamen die Probanden an den Messterminen zwei bis vier den Muskelsauerstoff-Monitor *IDIAG Moxy* (IDIAG AG, Schweiz) zur Ermittlung der peripheren Sauerstoffsättigung im Muskel auf den rechten Oberschenkel geklebt. Dabei wurde das Verhältnis der Oxyhämoglobinkonzentration zum Gesamthämoglobin im Muskel gemessen und als Prozentsatz ( $SmO_2$ ) angegeben. Das tragbare Gerät wurde mittels handelsüblichen Fixumull-Stretch-Pflaster direkt auf den musculus vastus lateralis positioniert und zusätzlich mit der Radhose verdeckt, um ein Lösen des Sensors während des Testverlaufes zu verhindern. Nach einer dreiminütigen Ruhephase (R), zur Ermittlung der Vorbelastungswerte (Herzfrequenz, spiroergometrische Parameter, Laktat- und Glukosekonzentration) begann das achtminütige Warmfahren bei 70 Watt beziehungsweise 100 Watt. Nach Beendigung des Warm-Ups wurde ein weiteres Mal kapilläres Blut zur Laktat- und Glukosekonzentrationsbestimmung entnommen (M1). Anschließend ist für jeden Probanden das individuelle Wingate-Testprotokoll, welches insgesamt vier 30-sekündige All-Out-Belastungen mit jeweils einer aktiven Pausenzeit von einer, drei oder zehn Minuten zwischen den Tests vorsah, eingestellt worden. Es folgte noch eine kurze Unterrichtung des Probanden, dass der komplette Test ausschließlich in der Sitzposition zu fahren ist und welche Messparameter zu welchen Zeitpunkten ermittelt werden (s. Abb. 4). Anschließend begann das Testprotokoll mit einer 10-sekündigen Einrollphase, gefolgt von dem ersten WAnT. Nach der ersten 30-sekündigen All-Out-Belastung hatten die Probanden eine aktive Regenerationsphase von einer, drei oder zehn Minuten bei 70 Watt beziehungsweise 100 Watt. Anschließend folgten der WAnT zwei, drei und vier mit identischer aktiven Pausenzeit zwischen den einzelnen Belastungen. Nach der erfolgreichen Absolvierung des vierten All-Out-Tests schloss sich eine 15-minütige Ausfahrphase bei 70 Watt beziehungsweise 100 Watt an. Für jeden einzelnen WAnT ist die maximale Leistung, die durchschnittliche Leistung sowie die minimale Leistung jeweils in Watt durch die Software *FES RadEgometer II* (Version 2.6.6.31) registriert worden. Zusätzlich wurden noch Parameter wie Trittfrequenz und Effizienz erhoben, welche allerdings nicht in die Auswertung einfließen. An den Messzeitpunkten M2, M4, M6 und M8 wurden jeweils kapilläres Blut zur Laktat- und Glukosebestimmung entnommen sowie die subjektive Bewertung der wahrgenommenen Anstrengung (RPE-Skala) erfragt und notiert. An den Messzeitpunkten M3, M5 und M7 erfolgte die Erfragung der subjektiven Bewertung der wahrgenommenen Regeneration (TQR-Skala) sowie bei der Pausenzeit von 10 Minuten eine Blutentnahme zur Laktat- und Glukosebestimmung. In der 15-minütigen Ausfahrphase wurde zu den Messzeitpunkten E3, E6, E9, E12 und E15 sowohl die Laktat- und Glukosekonzentration bestimmt, als auch die jeweilige subjektive Bewertung der wahrgenommenen Regeneration dokumentiert. Über den kompletten Testzeitraum ist die Herzfrequenz, die ventilatorischen Parameter (u.a. absolute und relative Sauerstoffaufnahme und respiratorischer Quotient) sowie die periphere Sauerstoffsättigung kontinuierlich aufgezeichnet

worden. Das Herzfrequenz-Messgerät wurde im Anschluss mittels der Software *Polar ProTrainer 5* (Version 5.41.002) ausgelesen und die relevanten Daten für die jeweiligen Messzeitpunkte bestimmt. Die Messdaten der ventilatorischen Aufzeichnung wurden im Nachgang für jeweils 10 Sekunden gemittelt und zu einem Messwert zusammengefasst.



Abb. 4. Testdurchführung des WAnT auf dem Radergometer

Innerhalb des vorliegenden Forschungsprojektes sind zusätzlich an den beiden Messterminen mit einer beziehungsweise drei Minuten aktiver Regenerationszeit, hämodynamische Messparameter oszillometrisch ermittelt sowie ein Cold-Pressor Test durchgeführt worden. Anhand des Messgerätes *Mobil-O-Graph* (I.E.M., Deutschland) wurde vor der Testdurchführung des WAnT bei den Probanden der zentrale aortale und periphere arterielle Blutdruck ermittelt sowie die Pulswellengeschwindigkeit und die arterielle Gefäßsteifigkeit. Zusätzlich erfolgte nach der Hämodynamik-Messung ein Cold-Pressor-Test. Dabei hielten die Probanden ihre Hand bis zum Handgelenk für zwei Minuten in 5°C kaltes Wasser. Direkt nach dem Herausnehmen der Hand wurde die Hämodynamik-Messung wiederholt, um die Reaktion des Blutdruckes und der Gefäße auf die Kältereaktion zu dokumentieren. Zusätzlich ist der subjektiv wahrgenommene Schmerz mittels Schmerzskala (s. Anhang) erfasst worden. Nach der Testdurchführung des WAnT auf dem Radergometer folgte eine 45-minütige Ruhephase (liegend) in der das Messverfahren wiederholt wurde. Dabei fand in den zeitlichen Abständen fünf Minuten, 15 Minuten, 30 Minuten und 45 Minuten nach Beendigung des Radergometer-Tests eine Hämodynamik-Messung statt sowie eine kontinuierliche Messung der Herzfrequenzvariabilität über das Herzfrequenz-Messgerät *RS800 CX* (Polar Electro, Finnland). Anschließend wurde ein weiteres Mal der Cold-Pressor-

Test mit abschließender Ermittlung der hämodynamischen Parameter sowie Erfragung des subjektiv wahrgenommenen Schmerzempfindens durchgeführt. Die erhobenen Daten der Hämodynamik sowie des Cold-Pressor-Tests finden in der vorliegenden Dissertation keine weitere Verwendung und werden separat publiziert.

#### 4.3 Verwendete Messsysteme und Datenauswertung

##### Portable Spirometrie

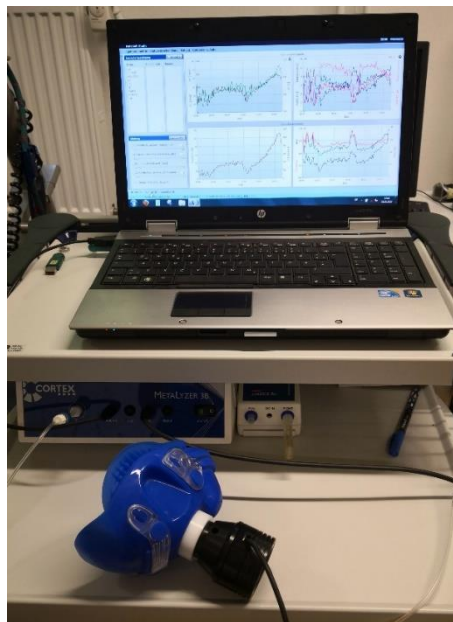


Abb. 5. Portable Spirometrie Metalizer 3B mit Software MetaSoft Studio (Cortex GmbH, Deutschland)

Mittels des hochauflösenden, stationären Spiroergometrie-Systems sind mit der Breath-by-Breath-Technologie die Parameter  $VO_2$  (in ml/min/kg und l/min),  $VCO_2$  (in ml/min/kg und l/min), VE (in l/min), der respiratorische Quotient sowie die Atemfrequenz erfasst worden (s. Abb. 5). Die Verarbeitung der Daten erfolgte durch die Anwendungssoftware *MetaSoft Studio* (Version 4.7.1.). Dabei wurden die erhobenen Messparameter jeweils auf 10 Sekunden gemittelt und als ein Messwert ausgegeben. Für die Bestimmung der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme sowie des respiratorischen Quotienten für den jeweiligen WAnT wurde der höchste  $VO_2$ -Wert und der dazugehörige RQ-Wert innerhalb des 30-sekündigen Ergometer-Tests genommen. Zur Ermittlung der relativen Sauerstoffaufnahme und des respiratorischen Quotienten während der aktiven Pausenzeiten beziehungsweise der Erholungswerte E3, E6, E9, E12 und E15 innerhalb der 15-minütigen Ausfahrphase ist der jeweilige Durchschnittswert eine Minute vor dem benötigten Messpunkt verwendet worden.

## Aufzeichnung der Herzfrequenz



Abb. 6. Herzfrequenz-Messgerät RS800 CX (Polar Electro, Finnland)

Mittels des Herzfrequenz-Messgerätes *RS800 CX* und dem dazugehörigen Polar WearLink W.I.N.D-Sender der Firma *Polar* sind die Herzfrequenzen (in S/min) über den kompletten Messzeitraum kontinuierlich aufgezeichnet worden (s. Abb. 6). Bei der RR-Datenaufzeichnung sind die Herzfrequenz-Variationen mit einer Auflösung von einer Millisekunde erfasst worden. Die Daten sind im Anschluss an die Messung mit der Software *Polar ProTrainer 5* ausgelesen und grafisch dargestellt worden. Der maximale Herzfrequenz-Wert innerhalb des jeweiligen WAnT ist als höchste erreichte Herzfrequenz verwendet worden. Für die Bestimmung der Herzfrequenzen während der aktiven Pausenzeiten sowie der Erholungswerte E1, E3, E6, E9, E12 und E15 der 15-minütigen Ausfahrphase sind die Durchschnittswerte 30 Sekunden vor dem jeweils benötigten Messzeitpunkt ermittelt worden. Für jeden Probanden und für jedes WAnT-Protokoll wurde die prozentuale Erholung der Herzfrequenz ( $\%Erholung_{Hf}$ ) durch folgende Formel berechnet:

$$\%Erholung_{Hf} = \frac{Herzfrequenz_{WAnT} - Herzfrequenz_{Pause}}{Herzfrequenz_{WAnT}} \times 100$$

## Analysegerät zur Laktat- und Glukosebestimmung



Abb. 7. Analysegerät SUPER GL ambulance (Dr. Müller Gerätebau GmbH, 2010)

Der Analysator SUPER GL ambulance (s. Abb. 7) ist ein Gerät für biochemische Analysen in der In-vitro-Diagnostik und wurde für die Bestimmung von Laktat und Glukose konzipiert (Dr. Müller Gerätebau GmbH, 2010, S. 6). Mittels eines elektrochemischen Messprinzips sind die Laktat- und Glukosekonzentrationen in Ruhe, direkt nach den jeweiligen WANTs, kurz vor Beendigung der Pausen (nur bei einer Regenerationszeit von 10 Minuten) sowie innerhalb der 15-minütigen Ausfahrphase bei den Erholungsmesszeitpunkten E3, E6, E9, E12 und E15 bestimmt worden. Für jeden Probanden und jedes WAnT-Protokoll errechnete sich im Nachhinein die Änderung der Laktatkonzentration ( $\% \Delta_{\text{Laktat}}$ ) mittels folgender Formel:

$$\% \Delta_{\text{Laktat}} = \frac{\text{Laktat}_{\text{peak}} - \text{Laktat}_{\text{E15}}}{\text{Laktat}_{\text{peak}}} \times 100$$



## Radergometer



Abb. 8. Hochleistungsradergometer FES E2000 S (FES e.V., Deutschland)

Das Hochleistungs-Radergometer *E2000 S* vom Institut für Forschung und Entwicklung von Sportgeräten (FES) ist mit zwei Komponenten-Messpedalen ausgerüstet und ermöglicht es so die Wirkrichtungen der Kräfte zu bestimmen (s. Abb. 8). Mittels der Software *FES RadEgometer II* (Version 2.6.6.31) wurden für jeden einzelnen WAnT die Parameter maximale Leistung (in Watt), durchschnittliche Leistung (in Watt), minimale Leistung (in Watt), die Trittfrequenz (in U/min) sowie die Effizienz (in %) aufgezeichnet und grafisch dargestellt. Die Bremsleistung für den 30-sekündigen All-Out-Test (in %) ist anhand der maximalen Tretleistung beim  $VO_{2max}$ -Test individuell für jeden einzelnen Probanden bestimmt worden. Somit wurde sichergestellt, dass der Tretwiderstand während des WAnT individuell an das Leistungsniveau des Probanden angepasst war und sich nicht ausschließlich nur an dem Körpergewicht orientierte. Für jeden Probanden und für jedes WAnT-Protokoll wurde im Anschluss intraindividuell die Reproduzierbarkeit der maximalen, durchschnittlichen und minimalen Tretleistung zwischen den einzelnen WAnTs (%Erholung) berechnet. Dies geschah mit folgender mathematischer Formel:

$$\%Erholung = \frac{Leistung_{WAnT2}}{Leistung_{WAnT1}} \times 100$$



Zur Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall, ist für jeden Probanden der jeweilige prozentuale Abfall der Leistung innerhalb des WAnT über die 30 Sekunden Testdauer berechnet worden (%Leistungsabfall<sub>WAnT</sub>). Dabei wurde folgende Formel angewendet:

$$\%Leistungsabfall_{WAnT} = \frac{\text{maximale Leistung}_{WAnT} - \text{durchschnittliche Leistung}_{WAnT}}{\text{maximale Leistung}_{WAnT}} \times 100$$

Zusätzlich ist der prozentuale Leistungsabfall über den kompletten Testverlauf des HIIT von dem ersten WAnT zum vierten WAnT für jeden Probanden und die unterschiedlichen Regenerationszeiten (eine Minute, drei Minuten und zehn Minuten) errechnet worden. Dies geschah mittels der Formel:

$$\%Leistungsabfall_{HIIT} = 100 - \left( \frac{\text{durchschnittliche Leistung}_{WAnT4}}{\text{durchschnittliche Leistung}_{WAnT1}} \times 100 \right)$$

## Hämodynamik



Abb. 9. Mobil-O-Graph mit Armmanschette (I.E.M., Deutschland)

Mit Hilfe des klinisch validierten Gerätes *Mobil-O-Graph* für hämodynamische Messungen konnte nichtinvasiv der zentrale aortale und periphere arterielle Blutdruck der Probanden vor und nach der kurzzeitigen hochintensiven Belastung auf dem Radergometer gemessen werden (s. Abb. 9). Zugleich konnte für jeden Teilnehmer eine Pulswellenanalyse vorgenommen werden. Dafür wurde die passgenaue Armmanschette am rechten Arm des Probanden befestigt und auf eine maßgeschneiderte Armstütze gelegt, so dass das Herz und die Blutdruckmanschette auf demselben Niveau waren. Dabei wurden neben dem zentralen und peripheren Blutdruck auch der mittlere arterielle Druck, die Herzfrequenz, der Augmentationsdruck, der Augmentationsindex, der Reflexionskoeffizient sowie der periphere Widerstand bestimmt. Darüber hinaus konnte des Weiteren der Aortensteifigkeitsindex berechnet werden (Franssen & Imholz, 2010). Zur Datenaufbereitung wurde die Auswerteeinheit *Hypertonie Management Software - HMS CS Client-Server* verwendet.

### *Muskelsauerstoff-Monitor*



Abb. 10. IDDIAG Moxy - Muskelsauerstoff-Monitor (IDDIAG AG, Schweiz)

Der IDDIAG Moxy ist ein Muskelsauerstoff-Monitor, welcher mittels handelsüblichen Fixumull-Stretch-Pflaster an den Messtagen zwei bis vier direkt auf dem Muskel (musculus vastus lateralis) befestigt wurde (s. Abb. 10). Mittels der Nahbereich-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) konnte der Sensor auf Grundlage von Algorithmen die relative Sauerstoffsättigung ( $SmO_2$ ) kontinuierlich aufzeichnen und einen Einblick in das Verhältnis von Sauerstofftransport und Sauerstoffverbrauch geben. Dabei wurde das Verhältnis der Oxyhämoglobinkonzentration zum Gesamthämoglobin im Muskel gemessen und als Prozentsatz ( $SmO_2$ ) ausgegeben. Mittels Bluetooth- und Ant+-Verbindung sind die Daten im Anschluss an die Messung ausgelesen und in der vom Hersteller bereitgestellten Software gespeichert worden.

## Bioimpedanzanalyse (4-Punkt-Waage)



Abb. 11. 4-Punkt-Waage Tanita BC-545N (Tanita Europe BV, Niederlande)

Mittels der 4-Punkt-Waage *Tanita BC-545N* wurde zu Beginn eines jeden Messtages eine bioelektrische Impedanzanalyse durchgeführt (s. Abb. 11). Somit konnte individuell die Körperzusammensetzung des Probanden ermittelt werden. Bei jeder Messung wurden das Körpergewicht (in kg), der Körperfettanteil (in %), die fettfreie Masse (in kg), der Körperwasseranteil (in %), der Viszeralfettanteil sowie der Grundumsatz (in kcal/d) für jeden Teilnehmer bestimmt.

## Bioimpedanzanalyse (liegend)



Abb. 12. Body Impedance Analyzer (Data Input GmbH, Deutschland)

Mit Hilfe des bioelektrischen Impedanzanalysators *Body Impedance Analyzer* wurde am Tag der Eingangsuntersuchung (erster Messtag) von jedem Probanden eine Messung der Körperzusammensetzung in der liegenden Position durchgeführt (s. Abb. 12). Über Hautelektroden wurde ein homogenes elektrisches Wechselstromfeld mit konstanter Stromstärke in der Messperson erzeugt und der Gesamtwiderstand Impedanz ( $Z$ ) in Ohm gemessen. Zusätzlich konnten die Widerstände Resistance ( $R$ ) und Reactance ( $X_c$ ) sowie der Hand- ( $R_{\uparrow}$ ) und Fußwiderstand ( $R_{\downarrow}$ ) durch das Messgerät erfasst werden. Durch die Eingabe der Messwerte inklusive der Körpergröße, des Gewichtes und des Geschlechts des jeweiligen Probanden in die Software *Nutri 3* konnte im Anschluss die Körperzusammensetzung, in Form von Magermasse (in kg), Fettmasse (in kg und %), Körperwasser (in l) und der Grundumsatz (in kcal/d) berechnet werden (siehe Anhang).

### *Sprungkraft*



Abb. 13. OptoJump (Microgate Srl, Italien)

Das optische Messinstrument *OptoJump* besteht aus einem sendenden und einem empfangenen Messstab (s. Abb. 13). Dabei sind beide Messstäbe mit LED-Lichtern bestückt, die kontinuierlich miteinander kommunizieren. Dadurch kann das System jeweilige Unterbrechungen registrieren und deren Dauer berechnen. Somit lässt sich die Flugzeit mit einer Genauigkeit von einer tausendstel Sekunde bestimmen. Auf Grundlage der ermittelten Flugzeit kann dann die entsprechende Sprunghöhe des Probanden berechnet werden. Zur Ermittlung der Sprungkraft führten die Probanden am ersten Messtag zwei Counter-Movement-Jumps durch. Dabei absolvierte der Sportler einen vertikalen Sprung mit einer vorangegangenen Auftaktbewegung nach unten. Die Ausholbewegung sollte ein zügiges und aktives Absenken in die

Hockposition beinhalten, um eine Vorspannung der Muskulatur zu erzeugen, mit einem anschließenden maximalen Sprung nach oben. Die Hände sollten dabei über den kompletten Bewegungsablauf in der Hüfte fixiert bleiben. Der CMJ wurde als Testinstrument gewählt, weil er eine hohe Reliabilität bei Messungen der Krafftähigkeit der unteren Extremitäten im Vergleich zu anderen Sprungtests aufweist. Des Weiteren lässt sich aus den Ergebnissen ein guter Zusammenhang zur Sprintleistung, der Maximalkraft und der Explosivkraft herstellen (Markovic et al., 2004).

### *Handkraft*



Abb. 14. Elektronischer Hand-Kraftmesser mit LCD-Display *newgen medicals* - PE-3720-919 (PEARL GmbH, Deutschland)

Mit Hilfe des Handkraftdynamometers wurde am ersten Messtag die Handkraft der linken und rechten Seite für jeden Probanden ermittelt (s. Abb. 14). Dabei nahmen die Sportler in stehender Position eine hüftbreite Fußstellung ein und winkelten den Arm im 90-Grad-Winkel an (Ellenbogen mit Kontakt zum Rumpf). Im Anschluss waren die Probanden aufgefordert mit einem konstanten Kraftaufbau ihr persönliches Maximum zu ermitteln. Die maximal erreichte Handkraft (in kg) wurde gespeichert und konnte für die jeweilige Seite vom Display abgelesen und notiert werden.

### *Ermittlung der subjektiven Bewertung der wahrgenommenen Anstrengung (RPE-Skala)*

Die RPE-Skala (Ratings of Perceived Exertion) nach Borg (1982) ist eine zuverlässige und valide Methode zur Bestimmung des individuellen

Anstrengungsempfindens. Dabei handelt es sich um eine Schätzsкала, deren Schätzungen linear mit der Leistung ansteigen und es ermöglichen die Beanspruchungsintensität der Sportler einzuschätzen. Für die vorliegende Forschungsarbeit wurde die RPE-Skala 6-20 verwendet. Je höher der angegebene RPE-Wert ist, umso höher ist die subjektiv wahrgenommene Anstrengung. Über die Skala kann näherungsweise die Herzfrequenz unter dynamischer Belastung durch die Multiplikation mit dem Faktor 10 ermittelt werden (Skalenwert  $\times 10 =$  Herzfrequenz) (Borg, 2004). Des Weiteren besteht eine enge Korrelation des RPE-Wertes zu entsprechenden physiologischen Parametern wie Laktatwerten, Sauerstoffaufnahme und Atemfrequenz während der Belastung (Loellgen & Borg, 2004). Für jeden Probanden und jedes WAnT-Protokoll wurde direkt nach Beendigung der jeweiligen 30-sekündigen Belastung die subjektiv wahrgenommene Anstrengung erfragt und im Testprotokoll vermerkt.

#### *Ermittlung der subjektiven Bewertung der wahrgenommenen Regeneration (TQR-Skala)*

Neben der Bestimmung des Anstrengungsempfindens während körperlicher Arbeit, wurde kongruent zur RPE-Skala ebenfalls eine Skala zur Beschreibung der Erholung nach einer Belastung eingeführt. Hierbei werden die subjektiven Qualitäten der Erholung nach einer Anstrengung (Total Quality Recovery-Skala) erfasst (Kenttä & Hassmén, 1998). Die dabei von den Autoren entwickelte TQR-Skala ist nach gleichem Prinzip wie die RPE-Skala aufgebaut. Ein hoher TQR-Wert entspricht dabei einer sehr guten subjektiv wahrgenommenen Regeneration. Mittels dieses Instrumentes kann der Regenerationsprozess überwacht werden und mit dem Trainings-/Belastungsprozess (RPE-Skala) verglichen werden. Für jeden Probanden und jedes WAnT-Protokoll wurden 15 Sekunden vor Ende der jeweiligen aktiven Regenerationsphase sowie für die Erholungswerte (E3, E6, E9, E12, E15) in der 15-minütigen Ausfahrphase die subjektiv wahrgenommene Regeneration erfragt und im Testprotokoll vermerkt.

#### *4.4 Statistische Auswertung*

Die statistische Auswertung des Datenmaterials erfolgt mit dem Statistikprogramm SPSS 25.0 für Windows 10 (Microsoft Corporation, USA). Für die deskriptive Auswertung wurden arithmetische Mittelwerte, Mediane, Spannweiten, Standardabweichungen und Varianzen berechnet. Die Berechnung von Korrelationen erfolgte gruppenunabhängig bei ausschließlich metrischen Daten nach Pearson und bei ordinalskalierten bzw. metrischen und ordinalskalierten Daten nach Spearman. Im Vorfeld der Prüfung der Mittelwerte wurden alle Daten zunächst mittels Histogrammanalyse und Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf

Normalverteilung getestet. Bei Vorliegen von nicht normalverteilten oder ordinalskalierten Variablen erfolgte die statistische Prüfung mit nichtparametrischen Tests. Um die Signifikanz der Veränderungen innerhalb einer Gruppe zu untersuchen, wurde der t-Test für gepaarte Stichproben, der Wilcoxon-Test angewendet (Bortz & Schuster, 2016). Um die Unterschiede zwischen den Gruppen darzustellen ist eine Varianzanalyse (1-way ANOVA) durchgeführt worden. Um eine Aussage über die Veränderungen der Absolutwerte während der einzelnen Tests zu treffen, kam eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA for repeated measures) zur Anwendung (Thomas et al., 2005). Sind die Variablen normalverteilt oder metrisch gewesen, wurden die Daten im Rahmen univariater allgemeiner linearer Modelle varianzanalytisch auf ihre statistische Signifikanz und inhaltliche Relevanz geprüft. Für die Haupteffekte sind varianzanalytisch die Parameter des Greenhouse-Geisser Tests (Diehl et al., 2002) angegeben worden (df; F; Signifikanz; Partielles Eta-Quadrat). Für die Berechnung der Interaktionseffekte zwischen der Pausenlänge und der jeweiligen Probandengruppe wurde eine mixed ANOVA gerechnet. Zusätzlich wurden die Haupteffekte für den jeweiligen Innersubjektfaktor (WAnT1min vs. WAnT3min, WAnT1min vs. WAnT10min, WAnT3min vs. WAnT10min) und die Zwischensubjektfaktoren (männlich vs. weiblich, sehr gut ausdauertrainiert vs. gut ausdauertrainiert, jung vs. alt) betrachtet. Zur Identifikation der Effekte ist jeweils eine Analysis of Variances (ANOVA) mit Messwiederholung zu den maximalen Leistungen, den durchschnittlichen Leistungen, der prozentualen Ermüdung sowie dem prozentualen Leistungsabfall gerechnet worden (Howell, 2002). Anschließend wurde der Post-hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur für die genaue Lokalisierung der Unterschiede durchgeführt. Im Vorfeld der Berechnung der Interaktionseffekte sowie der Haupteffekte wurden die Datensätze ebenfalls auf Ausreißer und Normalverteilung (mittels Shapiro-Wilks-Test) überprüft. Zusätzlich wurden die Sphärizität (mittels Mauchly-Tests), die Varianzgleichheit (mittels Levene-Tests) sowie die Gleichheit der Kovarianzmatrizen (mittels Box-Test) getestet. Bei einem signifikanten Mauchly-Test ist ein Korrekturverfahren angewendet worden (O'Brien & Kaiser, 1985; Salkind & Rasmussen, 2007). Dabei empfiehlt Girden (1992) die Grenze zwischen der Wahl der beiden Korrekturverfahren bei einem Greenhouse-Geisser-Epsilon von 0,75 festzulegen. Bei  $\epsilon > 0,75$  sollte demnach die Huynh-Feldt-Korrektur genutzt werden, während bei  $\epsilon < 0,75$  die Greenhouse-Geisser-Korrektur zur Anwendung kommen sollte.

Zur Interpretation der errechneten Werte wurde das Signifikanzniveau auf  $p < 0,05$  bzw.  $p < 0,001$  für hochsignifikante Unterschiede festgelegt.



## 5 Ergebnisse

### 5.1 Einfluss des Geschlechts auf abhängige Untersuchungsvariablen

Für die Untersuchung der geschlechtsspezifischen Unterschiede hinsichtlich des Belastungs- und Regenerationsverhaltens nach lokomotorischen Intervallbelastungen sowie der Einfluss von unterschiedlich langen aktiven Pausenzeiten sind insgesamt 47 Sportler (26 Männer, 21 Frauen) aus der Gesamtstichprobe einbezogen worden. Die leistungsbezogenen Parameter, wie maximale Herzfrequenz ( $p = 0,89$ ) und wöchentliches Trainingspensum ( $p = 0,61$ ) zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen. Des Weiteren gibt es keine Differenzen im  $VO_{2max}$ -Perzentil, welches hinsichtlich der maximalen Sauerstoffaufnahme, dem Alter und dem Geschlecht berechnet wurde (Graves et al., 2015). Somit ist eine vergleichbare maximale aerobe Leistungsfähigkeit zwischen den Männern und Frauen hergestellt. Die Analyse der anthropometrischen Daten zeigen Geschlechtsunterschiede in der Körpergröße ( $p < 0,001$ ), dem Gewicht ( $p < 0,001$ ), dem BMI ( $p = 0,007$ ) sowie der Magermasse ( $p < 0,001$ ) auf (s. Tab. 11). Zwischen den einzelnen Testtagen lagen keine signifikanten Änderungen der Bioimpedanzdaten vor.

Tab. 11. Geschlechtsspezifische Charakterisierung des Probandenkollektivs

	männlich		weiblich	
	MW	SD	MW	SD
Größe (m)	1,79	0,06	1,67	0,08**
Gewicht (kg)	75,95	7,05	59,49	7,86**
Alter (J)	40,85	14,29	33,38	12,89
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	23,76	2,20	21,55	3,13*
Sport pro Woche (h)	8,42	2,35	8,90	3,96
FM (%)	12,71	7,67	16,70	6,94
Magermasse (kg)	66,32	6,03	47,87	7,89**
HF <sub>max</sub> (S/min)	175,31	14,10	175,86	11,62
VO <sub>2max</sub> (ml/min/kg)	52,76	8,52	43,81	6,96**
KUADC Perzentil VO <sub>2max</sub>	89,45	15,60	81,32	15,19

\* $p < 0,05$  und \*\* $p < 0,001$

#### 5.1.1 Physikalische Leistung, Ermüdung sowie Erholung

Im Folgenden werden zunächst die Mittelwerte mit der Standardabweichung der maximalen Leistung (in W/kg), der durchschnittlichen Leistung (in W/kg) sowie die prozentuale Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs für die unterschiedlichen aktiven Regenerationszeiten tabellarisch sowie grafisch dargestellt und auf signifikante Mittelwertunterschiede geprüft. Des Weiteren wird die Erholung, in Form der prozentualen Veränderung der erreichten maximalen sowie durchschnittlichen Leistung, verglichen mit dem vorangegangenen WAnT ebenfalls für die



unterschiedlichen Regenerationszeiten dargestellt. Bei einer aktiven Pausenzeit von einer Minute zwischen den vier WAnTs zeigt sich, dass die Männer in allen vier 30-sekündigen All-Out-Tests im Durchschnitt sowohl eine höhere maximale Leistung als auch eine höhere durchschnittliche Leistung erreicht haben. Dieses Bild bestätigt sich ebenfalls bei der Betrachtung des prozentualen Leistungsabfalls innerhalb des jeweiligen WAnTs. Dabei weisen die weiblichen Probanden im Mittel einen höheren Leistungsabfall innerhalb der 30-sekündigen Ausbelastung auf (s. Tab. 12). Des Weiteren zeigt sich, dass die maximale sowie durchschnittliche Leistung, bezogen auf das Körpergewicht bei beiden Geschlechtern von WAnT zu WAnT abnimmt. Allerdings ist die prozentuale Erholung, in Form der Reproduzierbarkeit der Leistung verglichen mit dem vorangegangenen WAnT von den weiblichen Probanden im Mittel als höher anzusehen.

Tab. 12. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit einer Minute Pausenzeit von Männern und Frauen

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
männlich	10,86	2,05	8,70	1,29	8,02	1,31	7,74	1,23
weiblich	9,05	1,88	7,38	0,99	7,08	1,34	6,97	1,22
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
männlich	7,67	1,50	6,51	1,28	6,10	1,21	5,91	1,15
weiblich	5,45	1,13	4,78	0,92	4,59	0,94	4,56	0,87
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
männlich	28,79	9,77	25,32	9,55	24,02	9,39	23,59	9,38
weiblich	38,99	11,24	34,99	11,17	34,84	8,06	34,22	9,19

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse grafisch geschlechtsspezifisch gegenübergestellt und auf signifikante Mittelwertunterschiede überprüft. Dabei zeigt sich im Vergleich, dass die männlichen Probanden mit einer maximalen relativen Tretleistung von  $10,86 \pm 2,05$  vs.  $9,05 \pm 1,88$  W/kg ( $p = 0,003$ );  $8,70 \pm 1,29$  vs.  $7,38 \pm 0,99$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $8,02 \pm 1,31$  vs.  $7,08 \pm 1,34$  W/kg ( $p = 0,019$ ) und  $7,74 \pm 1,23$  vs.  $6,97 \pm 1,22$  W/kg ( $p = 0,039$ ) über die vier WAnTs mit einer Minute aktiver Pausenzeit ausnahmslos signifikant höhere Leistungen erreicht haben als die weiblichen Probanden. Innerhalb des zweiten WAnT ist der Mittelwertunterschied sogar als hochsignifikant anzusehen (s. Abb. 15). Bei der Betrachtung der maximal erreichten Leistungen über den Verlauf von vier WAnTs wird ersichtlich, dass sowohl bei den Männern als auch den Frauen ein stetiger Leistungsabfall von Test zu Test zu verzeichnen ist.

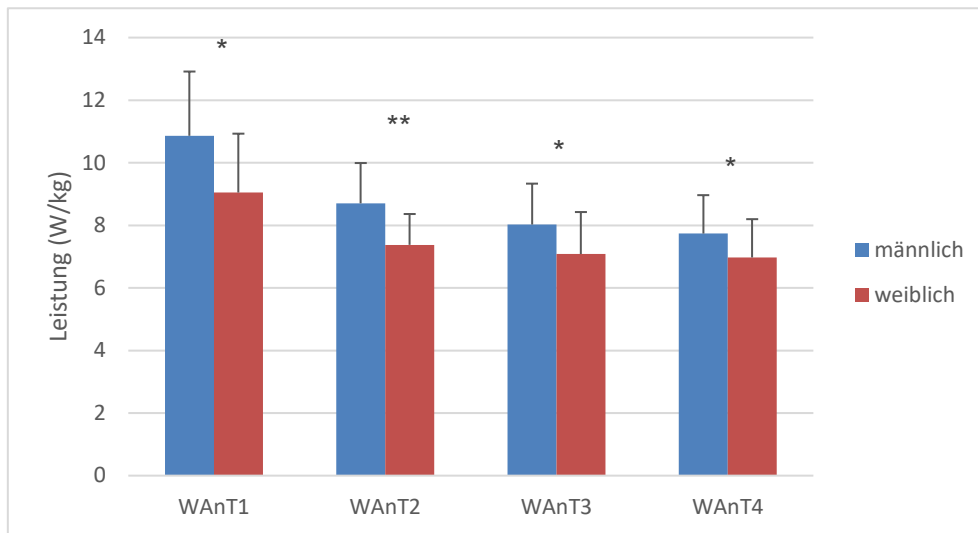


Abb. 15. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Die ermittelten Daten zeigen allerdings, dass die weiblichen Probanden besser in der Lage sind die maximale Leistung des vorangegangenen WAnTs zu reproduzieren als die männlichen Sportler (s. Abb. 16). Die im Durchschnitt ermittelten prozentualen Veränderungen von  $81,54 \pm 12,86$  vs.  $83,39 \pm 12,14$  % ( $p = 0,62$ );  $92,28 \pm 7,44$  vs.  $95,94 \pm 13,34$  % ( $p = 0,24$ ) und  $97,10 \pm 12,42$  vs.  $99,41 \pm 11,65$  % ( $p = 0,52$ ) weisen allerdings keine signifikanten Geschlechtsunterschiede auf.

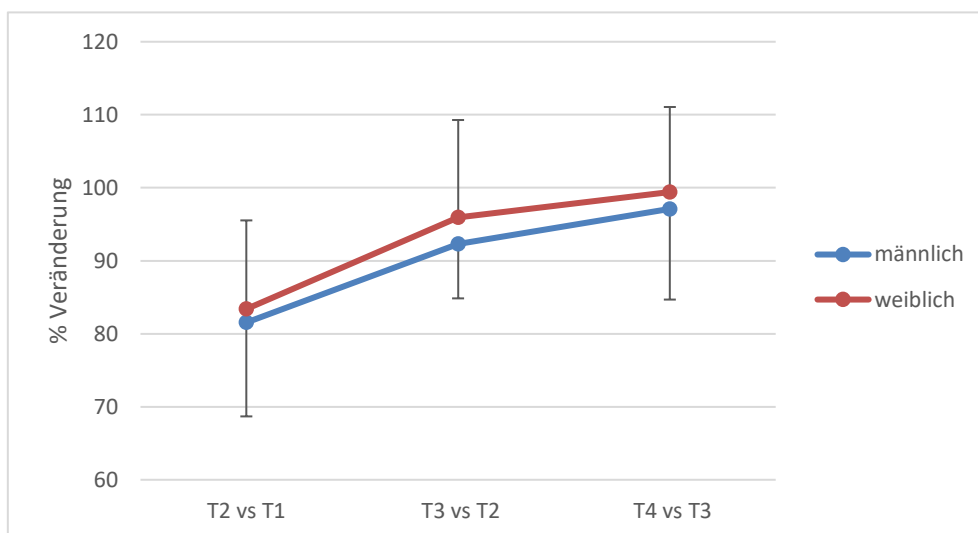


Abb. 16. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Wie bereits bei den maximalen Leistungen lässt sich auch bei der Betrachtung der durchschnittlich erreichten relativen Leistung über die vier WAnTs feststellen, dass es große geschlechtsspezifische Unterschiede gibt. Auch hier weisen die männlichen Probanden im Vergleich zu den weiblichen Sportlern mit  $7,67 \pm 1,50$  vs.  $5,45 \pm 1,13$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $6,51 \pm 1,28$  vs.  $4,78 \pm 0,92$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $6,10 \pm 1,21$  vs.  $4,59 \pm 0,94$  W/kg ( $p < 0,001$ ) und  $5,91 \pm 1,15$  vs.  $4,56 \pm 0,87$  W/kg ( $p < 0,001$ ) ausnahmslos höhere durchschnittliche Tretleistungen über den 30-sekündigen WAnT auf. Die Mittelwertunterschiede sind dabei in allen vier WAnTs als hochsignifikant anzusehen (s. Abb. 17).

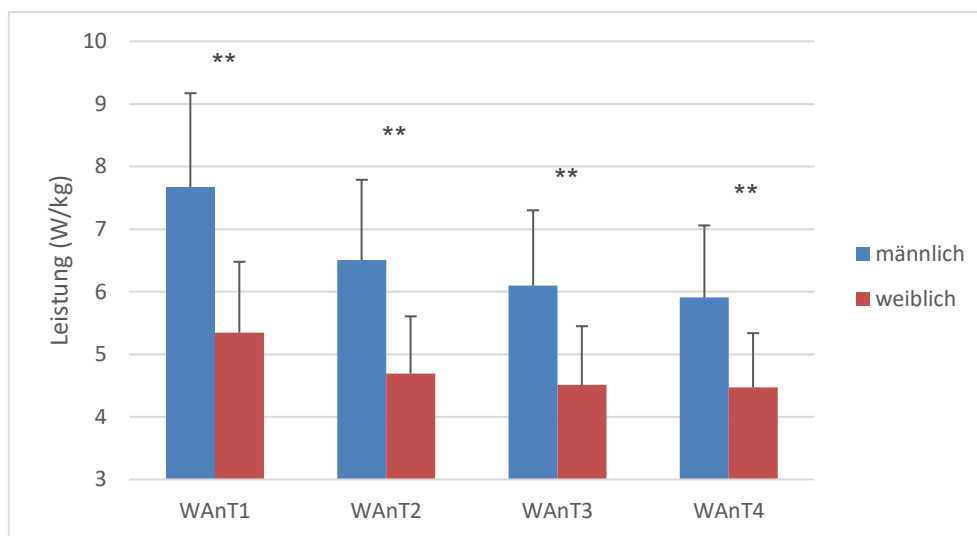


Abb. 17. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Wie bereits bei der prozentualen Erholung der maximalen Leistung festgestellt, bestätigt sich auch bei der durchschnittlichen Leistung, welche von WAnT zu WAnT im Mittel bei beiden Geschlechtern abnimmt, dass die weiblichen Probanden die durchschnittliche Tretleistung aus dem vorangegangenen 30-sekündigen All-Out-Test besser reproduzieren können als die männlichen Sportler (s. Abb. 18). Allerdings weisen auch hier die mittleren prozentualen Veränderungen von  $85,16 \pm 9,70$  vs.  $88,34,19 \pm 7,04$  % ( $p = 0,11$ );  $93,76 \pm 4,73$  vs.  $96,06 \pm 4,37$  % ( $p = 0,09$ ) und  $97,12 \pm 5,91$  vs.  $99,59 \pm 4,48$  % ( $p = 0,12$ ) keine signifikanten Mittelwertunterschiede auf.

In der Abbildung 19 wird der prozentuale Leistungsabfall innerhalb des jeweiligen WAnTs dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass die männlichen Probanden einen im Mittel geringeren Leistungsabfall in allen vier WAnTs verzeichnen. Im geschlechtsspezifischen Vergleich nimmt die Tretleistung innerhalb des jeweiligen WAnTs um  $28,79 \pm 9,77$  vs.  $38,99 \pm 11,24$  % ( $p = 0,002$ );  $25,32 \pm 9,55$  vs.  $34,99 \pm 11,17$  % ( $p = 0,003$ );  $24,02 \pm 9,39$  vs.  $34,84 \pm 8,06$  % ( $p < 0,001$ ) und  $23,59 \pm 9,38$

vs.  $34,22 \pm 9,19$  % ( $p < 0,001$ ) ab. Die Mittelwertunterschiede zwischen beiden Geschlechtern sind dabei in allen Durchgängen signifikant bzw. hochsignifikant. Zusätzlich zeigt sich bei den weiblichen Probanden, dass der Leistungsabfall innerhalb des zweiten, dritten und vierten WAnT nahezu konstant bleibt. Die männlichen Probanden weisen dahingehend einen immer geringer werdenden Leistungsabfall von WAnT zu WAnT auf.

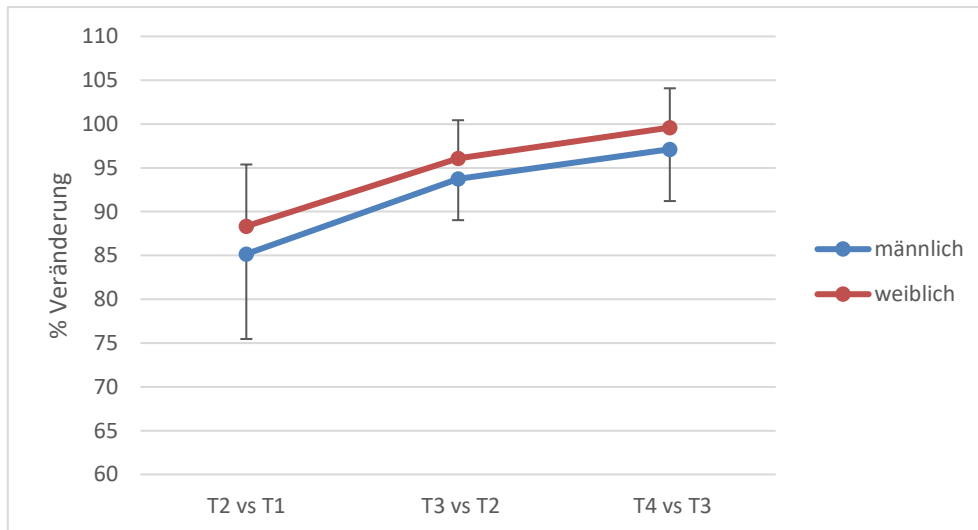


Abb. 18. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

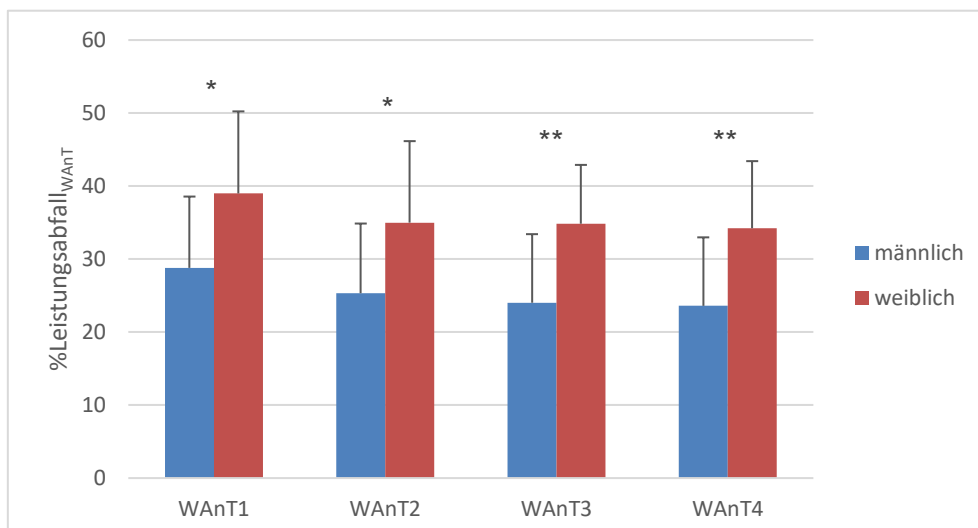


Abb. 19. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

In der folgenden Grafik (s. Abb. 20) ist die Korrelation zwischen der durchschnittlichen Leistung (in W/kg) und dem Leistungsabfall im WAnT mit einer Minute Pausenzeit geschlechtsbezogen dargestellt worden. Dabei wird ersichtlich, dass sowohl bei den männlichen als auch weiblichen Probanden ein starker negativer Zusammenhang zwischen beiden Variablen besteht. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt dabei für die Männer  $r = -0,68$  und für die Frauen  $r = -0,69$ .

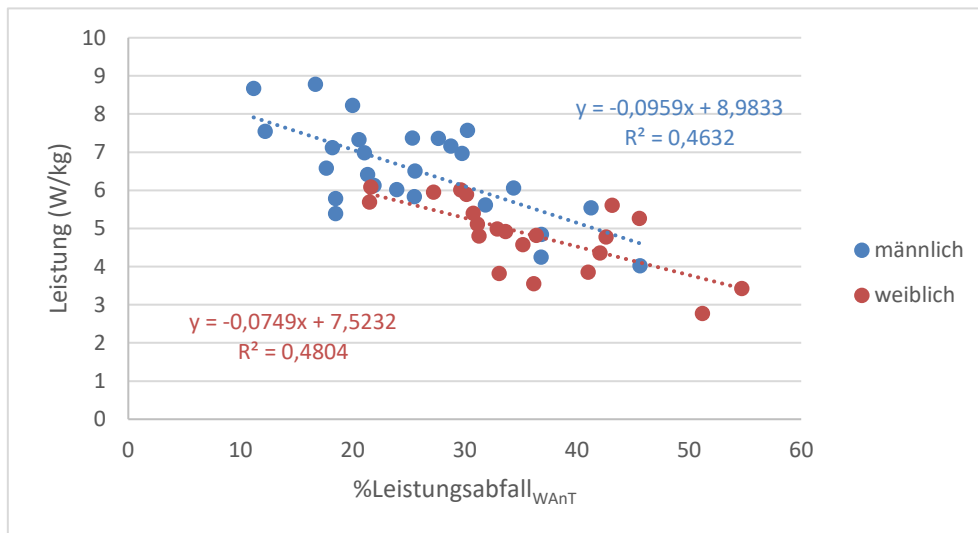


Abb. 20. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall<sub>WAnT</sub> bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen Männern und Frauen

In der folgenden Tabelle werden die im Mittel erreichte maximale Leistung, die durchschnittliche Leistung sowie der prozentuale Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs bei einer aktiven Pausenzeit von drei Minuten zwischen den einzelnen All-Out-Tests aufgeführt. Auch bei einer verlängerten aktiven Regenerationsphase zeigt sich, dass die männlichen Probanden sowohl in der maximalen relativen Tretleistung als auch in der durchschnittlichen relativen Tretleistung über die 30 Sekunden ausnahmslos höhere Wattwerte erreicht haben. Dasselbe Bild bestätigt sich bei der Betrachtung des prozentualen Leistungsabfalls. Die männlichen Sportler weisen in allen vier WAnTs einen geringeren Leistungsabfall als die weiblichen Probanden auf (s. Tab. 13). Des Weiteren zeigt sich, wie auch schon bei einer Pausenzeit von einer Minute, dass die maximale sowie durchschnittliche Leistung bei beiden Geschlechtern von WAnT zu WAnT abnimmt. Auch bei diesem Testprotokoll ist die prozentuale Erholung von den weiblichen Probanden im Mittel als höher anzusehen. Lediglich im dritten WAnT reproduzieren die männlichen Sportler die maximale Leistung im Vergleich zum vorangegangenen Test besser als die weiblichen Probanden.

Tab. 13. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit von Männern und Frauen

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
männlich	10,84	1,85	9,67	1,61	9,26	1,44	8,84	1,39
weiblich	9,45	2,08	8,60	1,99	8,06	1,77	7,95	1,75
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
männlich	7,83	1,49	7,16	1,36	6,84	1,31	6,73	1,28
weiblich	5,43	1,21	5,11	1,13	4,91	1,03	4,89	0,95
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
männlich	27,54	8,95	25,71	9,23	26,08	9,14	23,99	8,19
weiblich	41,89	9,53	39,96	9,85	38,50	9,19	37,67	10,25

Die folgende grafische Gegenüberstellung der maximalen Leistungen zeigt die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der maximalen Tretleistung bezogen auf das Körpergewicht. Die Männer weisen dabei mit  $10,84 \pm 1,85$  vs.  $9,45 \pm 2,08$  W/kg ( $p = 0,02$ );  $9,67 \pm 1,61$  vs.  $8,60 \pm 1,99$  W/kg ( $p = 0,049$ );  $9,26 \pm 1,44$  vs.  $8,06 \pm 1,77$  W/kg ( $p = 0,014$ ) und  $8,84 \pm 1,39$  vs.  $7,95 \pm 1,75$  W/kg ( $p = 0,059$ ) in den ersten drei WAnTs einen signifikanten Mittelwertunterschied in den erbrachten maximalen Leistungen auf. Der vierte 30-sekündige All-Out-Test weist dahingegen keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Geschlechtern aufweist (s. Abb. 21).

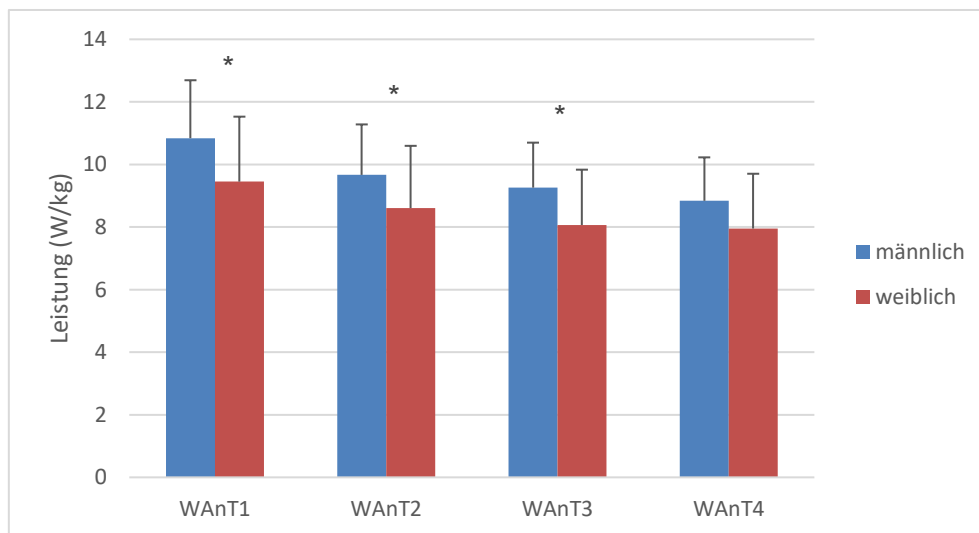


Abb. 21. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

Bei der Betrachtung der prozentualen Veränderung der maximalen Leistung, bezogen auf den vorangegangenen WAnT, zeigt sich, dass die weiblichen Probanden im zweiten und vierten Test besser in der Lage sind die Leistung wiederzugeben. Allerdings sind die prozentualen Veränderungen von  $89,65 \pm 8,75$

vs.  $91,60 \pm 10,90$  % ( $p = 0,50$ );  $96,34 \pm 8,33$  vs.  $94,82 \pm 11,15$  % ( $p = 0,60$ ) und  $95,69 \pm 8,27$  vs.  $99,23 \pm 10,88$  % ( $p = 0,20$ ) als nicht signifikant einzuschätzen (s. Abb. 22).

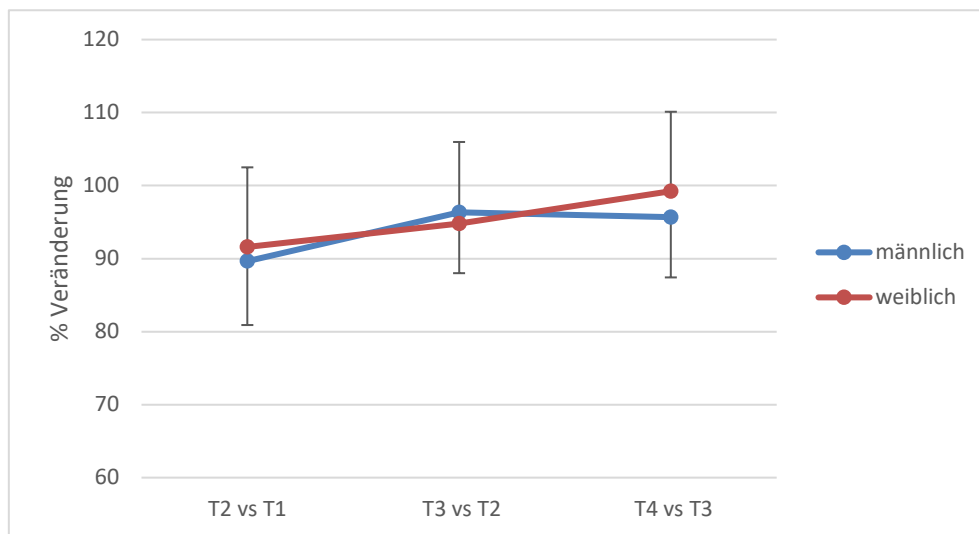


Abb. 22. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Die Gegenüberstellung der durchschnittlich erreichten Leistungen innerhalb des jeweiligen WAnTs zeigen, verglichen mit der maximalen Leistung, deutlichere geschlechtsspezifische Unterschiede. Bei einer aktiven Pausenzeit von drei Minuten zwischen den jeweiligen All-Out-Tests erreichten die männlichen Probanden dabei mit  $7,83 \pm 1,49$  vs.  $5,43 \pm 1,21$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $7,16 \pm 1,36$  vs.  $5,11 \pm 1,13$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $6,84 \pm 1,31$  vs.  $4,91 \pm 1,03$  W/kg ( $p < 0,001$ ) und  $6,73 \pm 1,28$  vs.  $4,89 \pm 0,95$  W/kg ( $p < 0,001$ ) in allen vier WAnTs hochsignifikant höhere durchschnittliche Tretleistungen als die weiblichen Probanden (s. Abb. 23).

Bei der Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Leistungen über den kompletten Testverlauf ist auch hier die prozentuale Erholung der weiblichen Probanden als besser einzuschätzen. Die Frauen weisen im geschlechtsspezifischen Vergleich mit  $91,63 \pm 5,17$  vs.  $94,19 \pm 5,40$  % ( $p = 0,11$ );  $95,60 \pm 4,94$  vs.  $96,69 \pm 5,01$  % ( $p = 0,46$ ) und  $98,30 \pm 3,39$  vs.  $99,91 \pm 3,74$  % ( $p = 0,13$ ) geringere prozentuale Veränderungen zum vorangegangenen WAnT in der durchschnittlichen Leistung auf, welche allerdings nicht signifikant sind (s. Abb. 24).

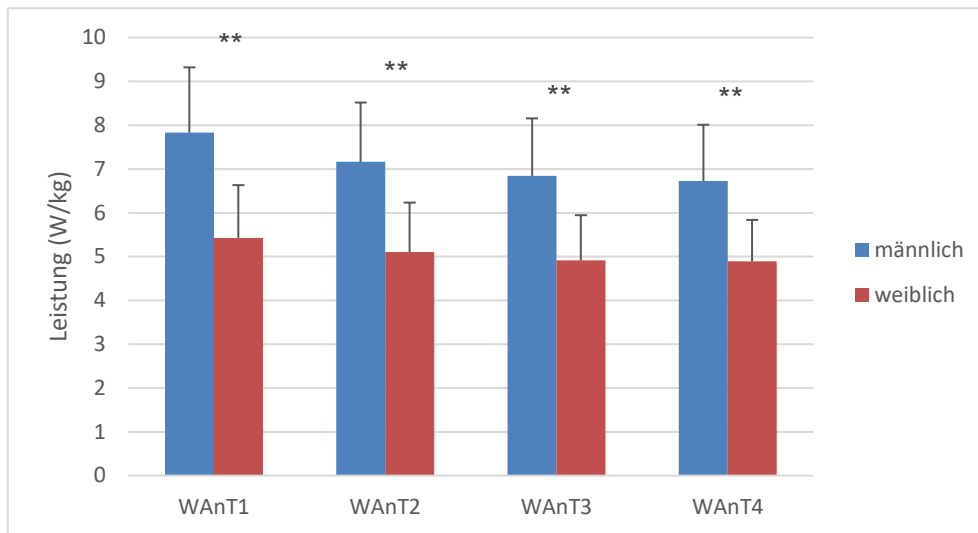


Abb. 23. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

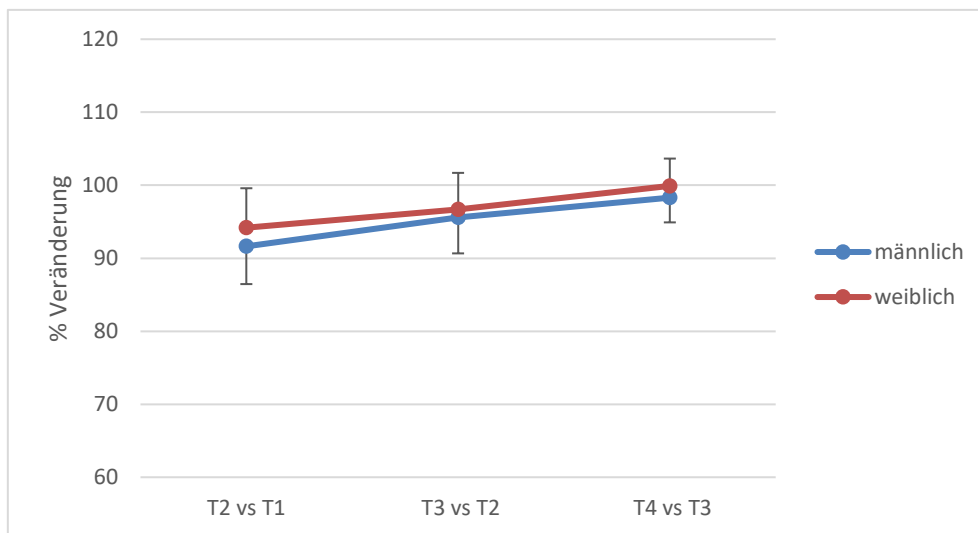


Abb. 24. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Werden im Folgenden der prozentuale Leistungsabfall wiederum für beide Geschlechter grafisch gegenübergestellt, so lässt sich auch hier ein großer Leistungsunterschied feststellen. Die männlichen Probanden weisen in allen vier WAnTs mit einem durchschnittlichen Leistungsabfall von  $27,54 \pm 8,95$  vs.  $41,89 \pm 9,53$  % ( $p < 0,001$ );  $25,71 \pm 9,23$  vs.  $39,96 \pm 9,85$  % ( $p < 0,001$ );  $26,08 \pm 9,14$  vs.  $38,50 \pm 9,19$  % ( $p < 0,001$ ) und  $23,99 \pm 8,19$  vs.  $37,67 \pm 10,25$  % ( $p < 0,001$ ) hochsignifikant geringere Werte auf als die weiblichen Probanden (s. Abb. 25). Allerdings lässt sich erkennen, dass die prozentualen Schwankungen zwischen dem ersten und vierten WAnT bei beiden Geschlechtern relativ ähnlich ausfallen. Die



männlichen Probanden weisen im zweiten 30-sekündigen All-Out-Test, verglichen mit dem dritten Durchgang sogar einen geringeren Leistungsabfall innerhalb der Testdurchführung auf. Bei den Frauen ist der erste WAnT der Test mit dem höchsten Leistungsabfall, welcher dann in Folge der weiteren drei Ausbelastungstests stetig geringer wird.

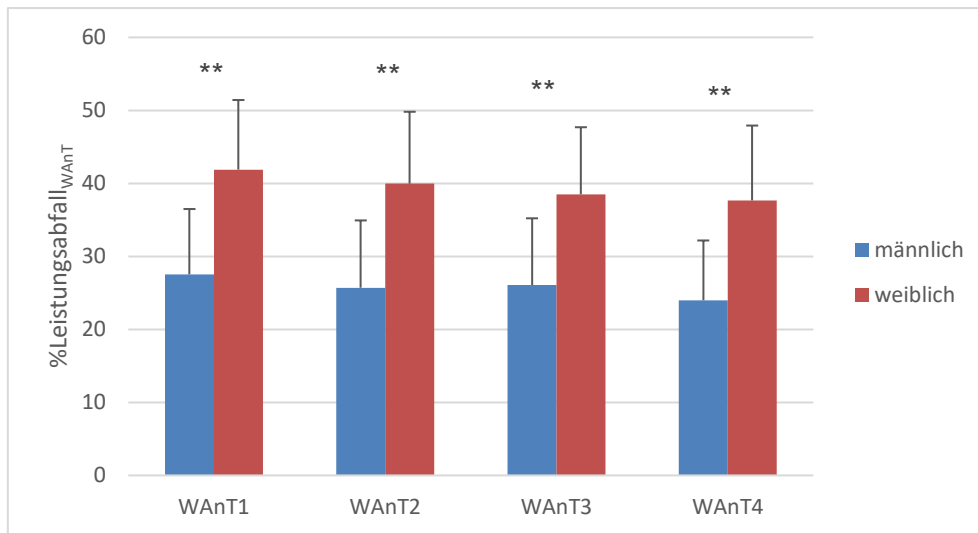


Abb. 25. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

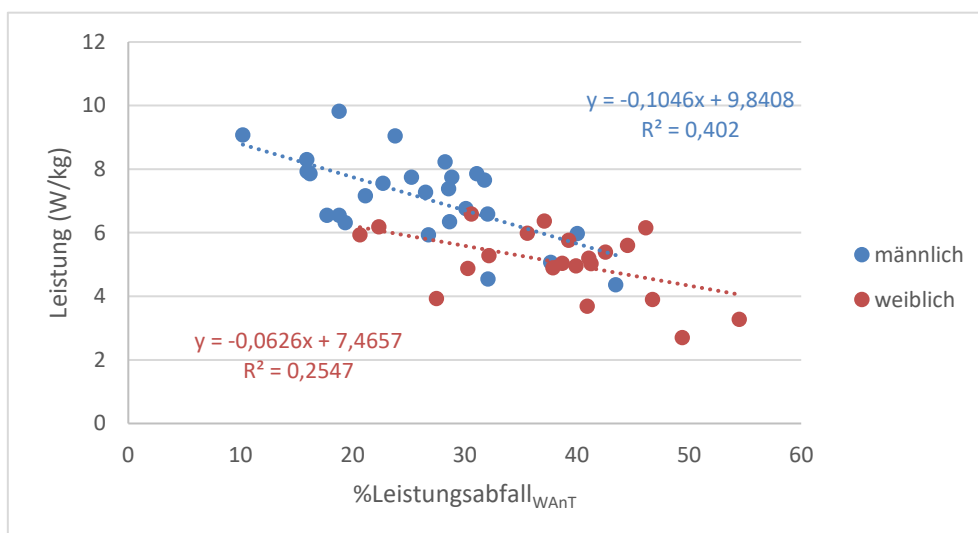


Abb. 26. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen Männern und Frauen

Die grafische Darstellung des Zusammenhangs der durchschnittlichen Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall beim WAnT mit einer Pausenlänge von drei Minuten zeigt, wie bereits bei kurzen Pausenzeit eine starke negative Korrelation

zwischen beiden Variablen bei den männlichen Probanden (s. Abb. 26). Der Korrelationskoeffizient beträgt dabei  $r = -0,63$ . Zeigte sich bei den Frauen bei kurzer Pause noch ein großer Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Leistung und prozentualem Leistungsabfall, so wird bei drei Minuten nur noch eine mittlere negative Korrelation sichtbar ( $r = -0,46$ ).

In der folgenden Tabelle werden die erreichten maximalen Leistungen, die durchschnittlichen Leistungen sowie der prozentuale Leistungsabfall für die männlichen und weiblichen Probanden für jeden einzelnen WAnT mit einer aktiven Pausenzeit von zehn Minuten dargestellt (s. Tab. 14). Auch hier lässt sich erkennen, dass die männlichen Sportler ausnahmslos in allen Versuchen eine im Mittel höhere maximale als auch durchschnittliche Leistung in dem jeweiligen WAnT erreicht haben. Gleiches lässt sich für den Leistungsabfall innerhalb der vier 30-sekündigen All-Out-Tests feststellen. Hier weisen die weiblichen Probanden in allen WAnT einen höheren Leistungsabfall auf. Generell lässt sich allerdings festhalten, dass beide Probandengruppen sowohl bei der maximalen als auch durchschnittlichen Leistung sehr konstante Ergebnisse über den kompletten Testverlauf mit jeweils zehn Minuten Pausenzeit erzielt haben. Die prozentuale Erholung, welche die Reproduzierbarkeit der Leistung zu dem vorangegangenen WAnT widerspiegelt, zeigt, dass beide Geschlechter nahezu in allen vier 30-sekündigen All-Out-Tests konstante maximale als auch durchschnittliche Tretleistungen absolvieren können. Die weiblichen Sportler weisen aber auch, wie bereits bei einer aktiven Pausenzeit von einer und drei Minuten, durchschnittlich geringere prozentuale Veränderungen im Vergleich zum vorangegangenen WAnT auf (s. Abb. 28 und 30).

Tab. 14. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit von Männern und Frauen

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
männlich	10,91	1,90	10,30	1,86	10,13	1,55	9,90	1,38
weiblich	9,12	1,77	8,53	1,63	8,51	1,71	8,67	1,73
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
männlich	7,83	1,49	7,71	1,40	7,64	1,42	7,63	1,40
weiblich	5,30	1,09	5,34	1,07	5,41	1,10	5,37	1,09
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
männlich	27,83	9,20	24,76	8,95	24,68	7,95	22,90	9,84
weiblich	41,44	8,56	36,97	9,69	36,03	9,52	37,74	8,50

Bei der detaillierten Betrachtung der durchschnittlich erreichten maximalen Leistungen bezogen auf das Körpergewicht, weisen die männlichen Probanden in allen vier WAnTs eine höhere Leistung auf (s. Abb. 27). Die maximale Tretleistung nimmt dabei von WAnT zu WAnT ab. Bei den weiblichen Probanden stellt sich diese

Tendenz nicht so dar. Im Mittel erreichen die Frauen im vierten WAnT die zweithöchste maximale Leistung. Die geschlechtsspezifischen Mittelwertunterschiede innerhalb der einzelnen Tests von  $10,91 \pm 1,90$  vs.  $9,12 \pm 1,77$  W/kg ( $p = 0,002$ );  $10,30 \pm 1,86$  vs.  $8,53 \pm 1,63$  ( $p < 0,001$ );  $10,13 \pm 1,55$  vs.  $8,51 \pm 1,71$  ( $p < 0,001$ ) und  $9,90 \pm 1,38$  vs.  $8,67 \pm 1,73$  ( $p = 0,009$ ) sind als signifikant bzw. hochsignifikant einzuschätzen.

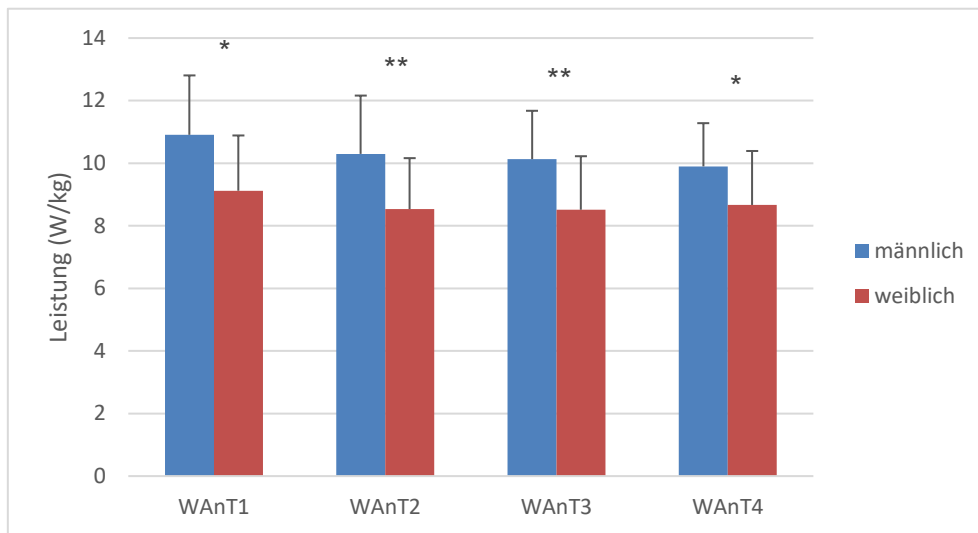


Abb. 27. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

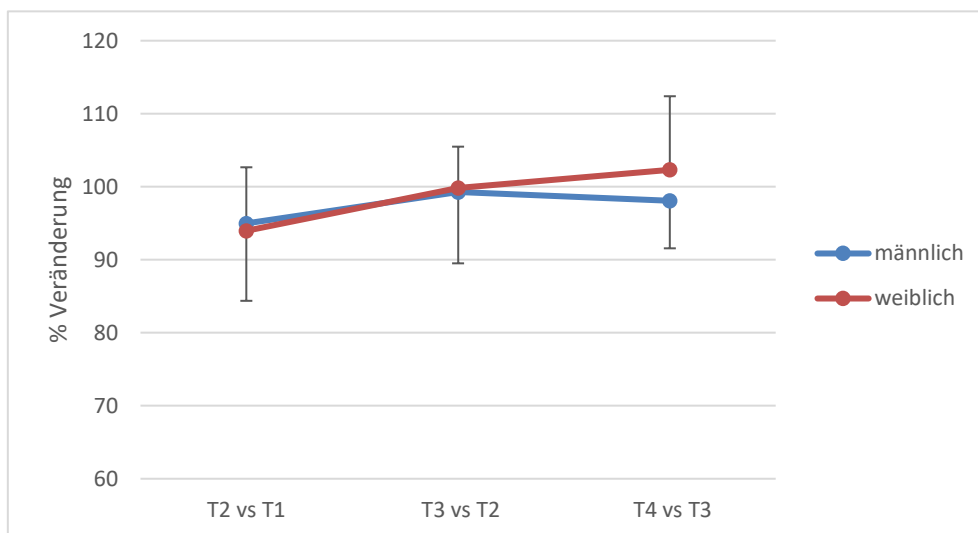


Abb. 28. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Die Darstellung der prozentualen Veränderung der maximalen Leistung in Bezug zu den vorangegangenen WAnT zeigt, dass es keinen signifikanten Geschlechtsunterschied gibt (s. Abb. 28). Allerdings zeigt sich auch bei einer aktiven Pausenzeit von zehn Minuten zwischen den einzelnen WAnTs, dass die weiblichen Probanden in zwei von drei Fällen eine höhere prozentuale Erholung von Test zu Test aufweisen ( $94,98 \pm 10,61$  vs.  $93,96 \pm 8,70$  %,  $p = 0,73$ ;  $99,27 \pm 9,77$  vs.  $99,85 \pm 5,64$  %,  $p = 0,81$  und  $98,08 \pm 6,52$  vs.  $102,31 \pm 10,08$  %,  $p = 0,09$ ). Die Frauen sind im vierten WAnT sogar in der Lage ihre erreichte maximale Leistung im Vergleich zum dritten WAnT durchschnittlich noch einmal zu steigern.

Die geschlechtsspezifische Gegenüberstellung der durchschnittlichen Leistungen für jeden einzelnen WAnT zeigt ebenfalls einen hochsignifikanten Unterschied zwischen Männern und Frauen (s. Abb. 29). Die männlichen Probanden erzielen dabei mit  $7,83 \pm 1,49$  vs.  $5,30 \pm 1,09$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $7,71 \pm 1,40$  vs.  $5,34 \pm 1,07$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $7,64 \pm 1,42$  vs.  $5,41 \pm 1,10$  W/kg ( $p < 0,001$ ) und  $7,63 \pm 1,40$  vs.  $5,37 \pm 1,09$  W/kg ( $p < 0,001$ ) deutlich höhere durchschnittliche Tretleistungen über die vier 30-sekündigen All-Out-Tests. Die männlichen Sportler weisen dabei einen stetigen Abfall der durchschnittlichen Leistung auf, währenddessen die weiblichen Probanden im ersten WAnT die geringste durchschnittliche Leistung erzielen und die höchste Tretleistung im dritten 30-sekündigen All-Out-Test erreichen.

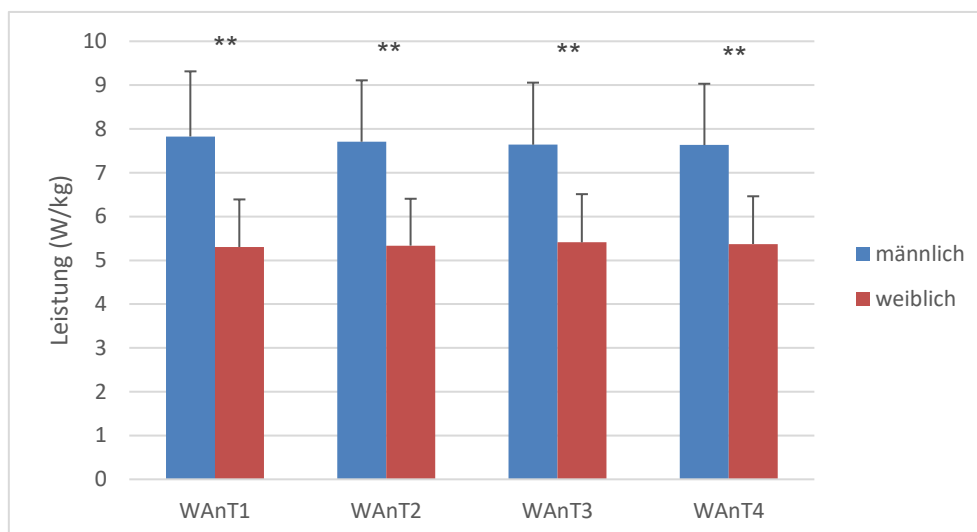


Abb. 29. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Bei der grafischen Darstellung der prozentualen Veränderungen der erreichten durchschnittlichen Leistung verglichen mit dem vorangegangenen WAnT kann beobachtet werden, dass beide Geschlechter ihre Leistungen von Test zu Test nahezu identisch wiedergeben können (s. Abb. 30). Die weiblichen Probanden sind sogar in der Lage ihre Tretleistungen im zweiten und dritten WAnT nochmals zu steigern. Die dabei auftretenden Mittelwertsunterschiede zwischen Männern und

Frauen sind allerdings nicht signifikant ( $98,66 \pm 4,95$  vs.  $100,74 \pm 5,97$  %,  $p = 0,16$ ;  $99,14 \pm 4,39$  vs.  $101,34 \pm 4,35$  %,  $p = 0,09$  und  $99,97 \pm 3,07$  vs.  $99,34 \pm 2,55$  %,  $p = 0,46$ ).

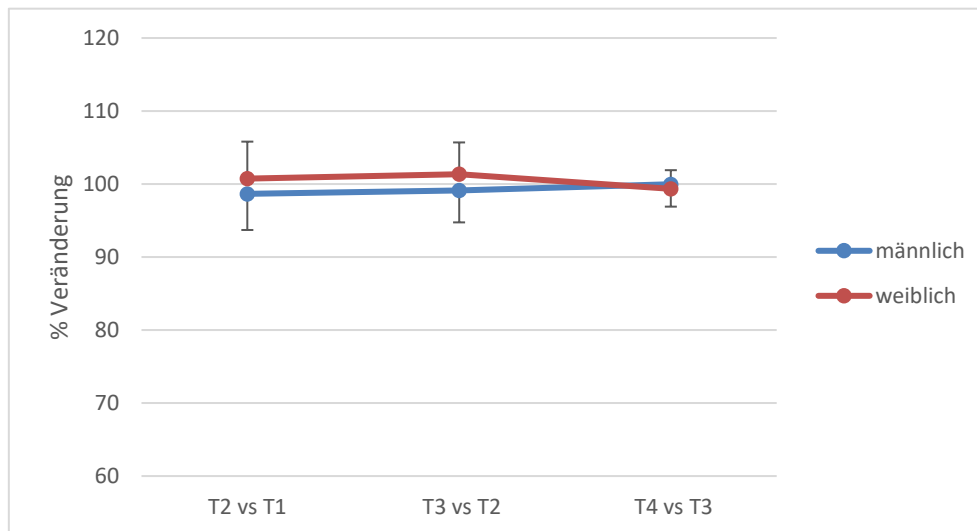


Abb. 30. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Der prozentuale Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs weist, wie bereits bei den aktiven Pausenzeiten von einer und drei Minuten, hochsignifikante Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden auf (s. Abb. 31). Männer haben im Mittel einen geringeren Leistungsabfall innerhalb der jeweiligen 30-sekündigen Belastung ( $27,83 \pm 9,20$  vs.  $41,45 \pm 8,56$  %,  $p < 0,001$ ;  $24,76 \pm 8,95$  vs.  $36,97 \pm 9,69$  %,  $p < 0,001$ ;  $24,68 \pm 7,95$  vs.  $36,03 \pm 9,52$  %,  $p < 0,001$  und  $22,90 \pm 9,84$  vs.  $37,74 \pm 8,50$  %,  $p < 0,001$ ). Der größte Leistungsabfall ist bei beiden Geschlechtern im ersten WAnT festzustellen. Während bei den männlichen Probanden der prozentuale Leistungsabfall im Durchschnitt über die vier Intervallbelastungen abnimmt, steigt bei den weiblichen Sportlern der Leistungsabfall im vierten WAnT noch einmal an.

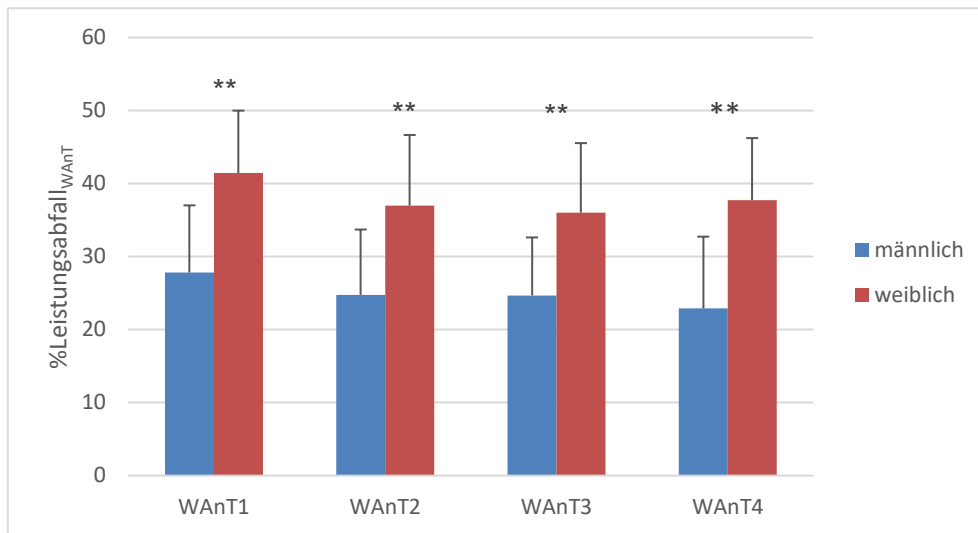


Abb. 31. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen Männern und Frauen. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Bei langer Pausenlänge zwischen den einzelnen WAnTs besteht wie bereits bei kurzer und mittlerer Regenerationszeit ein starker negativer Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall bei den männlichen Probanden ( $r = -0,58$ ). Die weiblichen Sportler weisen zwischen beiden Variablen eine mittlere negative Korrelation auf ( $r = -0,47$ ) (s. Abb. 32).

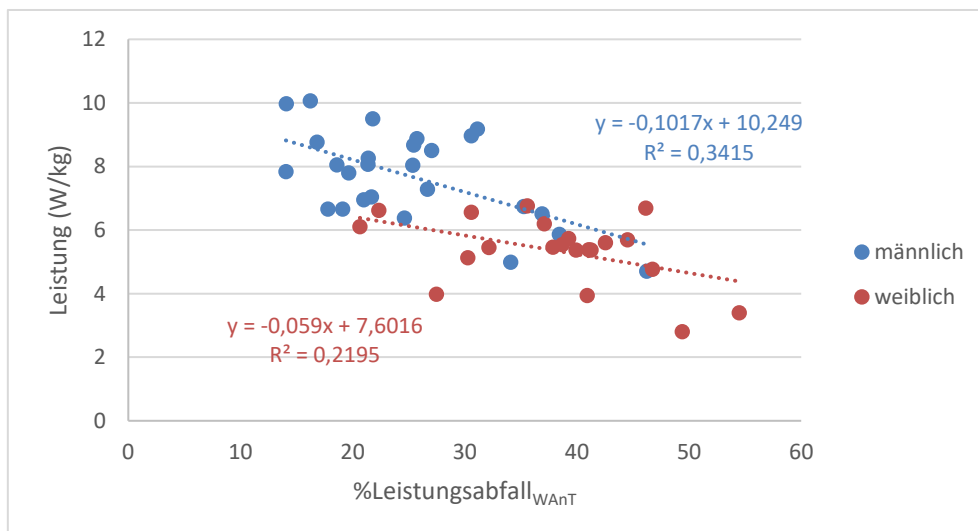


Abb. 32. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen Männern und Frauen

### 5.1.2 Pausenlänge

In den folgenden vier Abbildungen wird der Einfluss der Regenerationszeit zwischen den einzelnen WAnTs auf die maximale, durchschnittliche Leistung (W/kg) sowie den prozentualen Leistungsabfall während der Intervallbelastung und über den gesamten Verlauf des HIIT-Protokolls grafisch dargestellt und statistisch überprüft (s. Abb. 33-36). Unabhängig von der Länge der Pausenzeit zeigt sich, dass die maximale Leistung, die durchschnittliche Leistung sowie der Leistungsabfall innerhalb des WAnT hochsignifikante Mittelwertunterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden aufzeigen. Bei differenzierter Betrachtung erreichen die Männer sowohl bei einer aktiven Pausenlänge von einer Minute ( $8,83 \pm 1,93$  vs.  $7,62 \pm 1,61$  W/kg,  $p < 0,001$ ), drei Minuten ( $9,65 \pm 1,73$  vs.  $8,52 \pm 1,96$  W/kg,  $p < 0,001$ ) als auch zehn Minuten ( $10,31 \pm 1,70$  vs.  $8,71 \pm 1,70$  W/kg,  $p < 0,001$ ) zwischen den einzelnen WAnTs im Schnitt hochsignifikant höhere maximale Wattwerte (s. Abb. 33). Mit zunehmender Pausenlänge erzielen beide Stichproben höhere maximale Leistungen. Weiterhin zeigt sich, dass der Mittelwertunterschied in der maximalen Leistung zwischen den männlichen und weiblichen Probanden mit der Länge der Regenerationszeit zunimmt. Allerdings gibt es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Geschlecht  $F(2; 90) = 1,93$ ,  $p = 0,15$ , partielles  $\eta^2 = 0,041$ . Die Auswertung mittels ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden  $F(2; 92) = 53,43$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,54$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) in der maximalen Leistung zwischen allen drei Testprotokollen. Abschließend ist festzuhalten, dass ein signifikanter Haupteffekt des Geschlechts auftritt, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 45) = 10,85$ ,  $p = 0,02$ , partielles  $\eta^2 = 0,19$ .

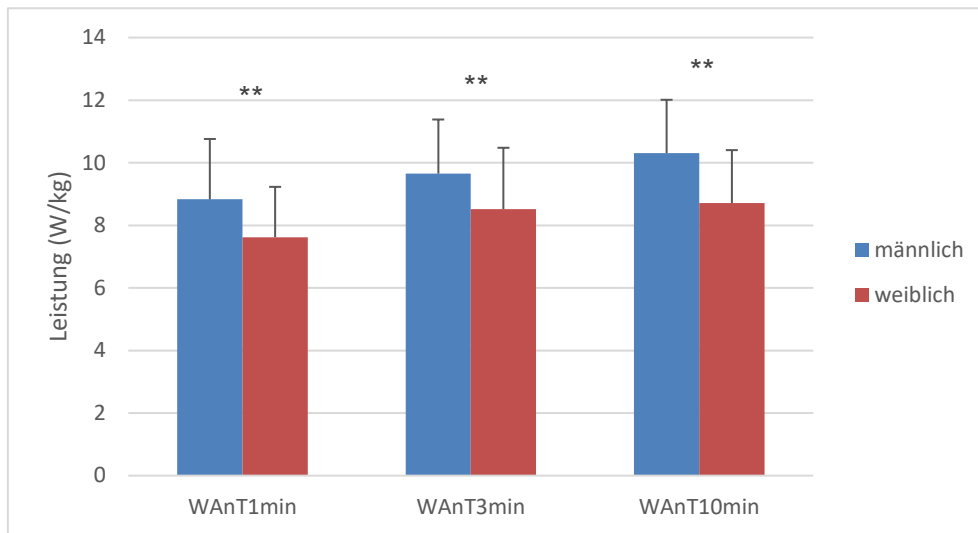


Abb. 33. Mittelwerte mit Standardabweichung der maximalen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Wie bereits bei der maximalen Leistung sind auch bei durchschnittlicher Tretleistung in Abhängigkeit der Pausenlänge große Differenzen zwischen Männern und Frauen sichtbar. Die Mittelwertunterschiede bei einer Minute ( $6,55 \pm 1,45$  vs.  $4,85 \pm 1,02$  W/kg,  $p < 0,001$ ), drei Minuten ( $7,14 \pm 1,41$  vs.  $5,08 \pm 1,08$  W/kg,  $p < 0,001$ ) und zehn Minuten Pausenlänge ( $7,70 \pm 1,41$  vs.  $5,36 \pm 1,07$  W/kg,  $p < 0,001$ ) zwischen den WAnTs weisen ebenfalls Hochsignifikanzen auf (s. Abb. 34). Wie bereits bei der maximalen Leistung festgestellt werden konnte, erreichen sowohl die männlichen als auch die weiblichen Probanden mit zunehmender Pausenlänge höhere durchschnittliche Wattwerte während des WAnTs. Ebenfalls steigt die Differenz zwischen beiden Gruppen in der durchschnittlichen Leistung mit zunehmender Regenerationszeit. Weiterhin zeigt sich eine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Geschlecht, Greenhouse–Geisser  $F(1,73; 77,83) = 25,63$ ,  $p = 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,36$ . Die Auswertung mittels ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden, Greenhouse–Geisser  $F(1,47; 67,55) = 121,35$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,73$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) in der durchschnittlichen Leistung zwischen allen drei Testprotokollen. Abschließend ist festzustellen, dass ein signifikanter Haupteffekt des Geschlechts auftritt, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 45) = 34,29$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,43$ .



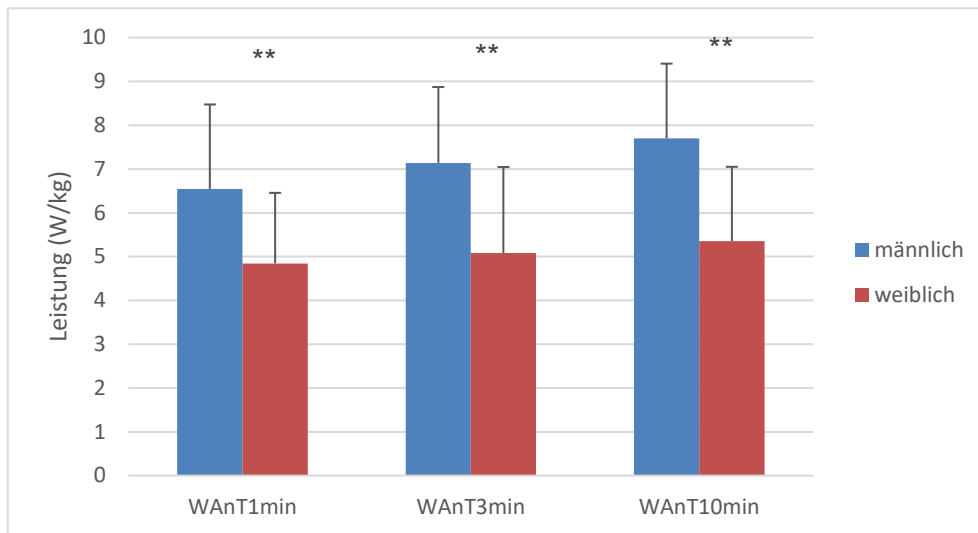


Abb. 34. Mittelwerte mit Standardabweichung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Die Darstellung des prozentualen Leistungsabfalls innerhalb des jeweiligen WAnT, bezogen auf das Geschlecht, lässt erkennen, dass die männlichen Probanden grundsätzlich eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall aufweisen. Die Mittelwertunterschiede sind sowohl bei einer Minute ( $25,43 \pm 9,61$  vs.  $35,76 \pm 10,01$  %,  $p < 0,001$ ), drei Minuten ( $25,83 \pm 8,85$  vs.  $39,51 \pm 9,67$  %,  $p < 0,001$ ) als auch zehn Minuten ( $25,04 \pm 9,05$  vs.  $38,05 \pm 9,15$  %,  $p < 0,001$ ) zwischen beiden Gruppen hochsignifikant (s. Abb. 35). Beide Stichproben verzeichnen bei mittellanger Pausenzeit durchschnittlich den höchsten prozentualen Leistungsabfall in den WAnTs. Währenddessen die Männer bei einer Pausenlänge von zehn Minuten die geringste Widerstandsfähigkeit erreichen, weist bei den Frauen das Testprotokoll mit einer Minute Regenerationsphase den durchschnittlich geringsten Leistungsabfall auf. Weiterhin zeigt sich, dass die männlichen Probanden, verglichen mit den weiblichen Sportlern einen deutlich konstanteren Leistungsabfall erzielen. Eine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Geschlecht ist festzustellen,  $F(2; 90) = 3,12$ ,  $p = 0,049$ , partielles  $\eta^2 = 0,065$ . Eine Auswertung mittels ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden  $F(2; 92) = 3,47$ ,  $p < 0,035$ , partielles  $\eta^2 = 0,70$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt dahingegen keine signifikanten Unterschiede in der dem  $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{WAnT}}$  zwischen den drei Testprotokollen. Abschließend lässt sich festhalten, dass ein signifikanter Haupteffekt des Geschlechts auftritt, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 45) = 27,76$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,38$ .

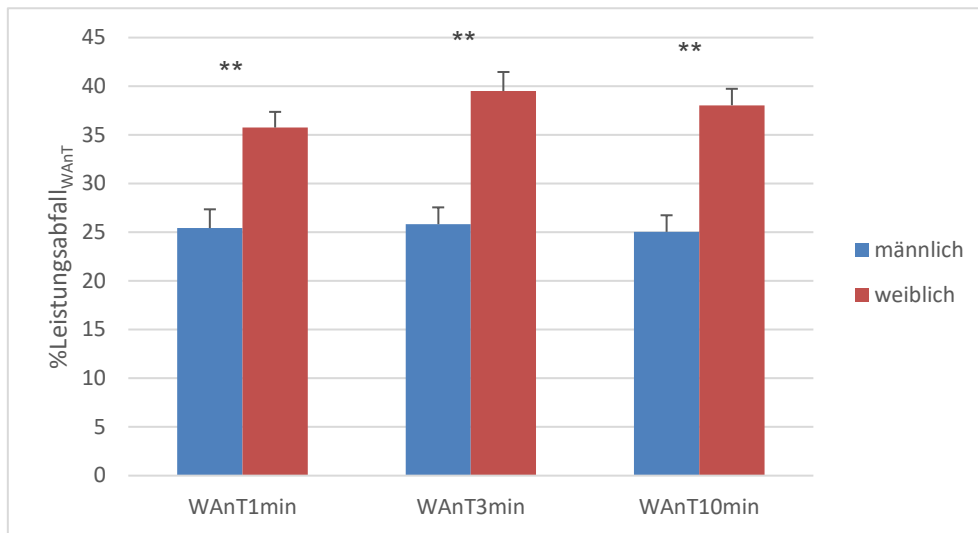


Abb. 35. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls aller vier WAnTs zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Die Betrachtung des prozentualen Leistungsabfalls zwischen dem ersten WAnT und dem vierten WAnT ( $\%Leistungsabfall_{HIIT}$ ) für die unterschiedlichen Testprotokolle zeigt dahingegen ein anderes Bild. Währenddessen die Männer innerhalb der 30-sekündigen Ausbelastungen sowohl bei einer, drei als auch zehn Minuten Pausenlänge eine durchschnittlich höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall aufweisen, zeigt sich bei der Begutachtung der Leistungsabfälle über den kompletten Testverlauf bei den Männern eine stärkere Leistungsverminderung für alle drei Testprotokolle (s. Abb. 36). Dabei sind die Mittelwertunterschiede zwischen beiden Geschlechtern bei der Testdurchführung mit einer Minute ( $22,29 \pm 11,87$  vs.  $15,36 \pm 9,82$  %,  $p = 0,037$ ) sowie mit 10 Minuten Pausenlänge ( $2,33 \pm 5,36$  vs.  $-1,36 \pm 6,15$  %,  $p = 0,033$ ) signifikant. Bei den weiblichen Probanden ist bei einer langen Regenerationszeit im Mittel sogar eine leichte Leistungssteigerung zwischen dem ersten WAnT und vierten WAnT sichtbar. Bei dreiminütiger Pausenzeit treten ebenfalls geschlechtsspezifische Unterschiede auf, allerdings sind diese statistisch nicht signifikant ( $13,70 \pm 9,34$  vs.  $8,93 \pm 8,84$  %,  $p = 0,082$ ). Insgesamt lässt sich geschlechtsunabhängig erkennen, dass der Leistungsabfall mit zunehmender Pausenzeit abnimmt. Des Weiteren verkleinern sich die Unterschiede im prozentualen Leistungsabfall zwischen Männern und Frauen mit steigender Regenerationszeit.

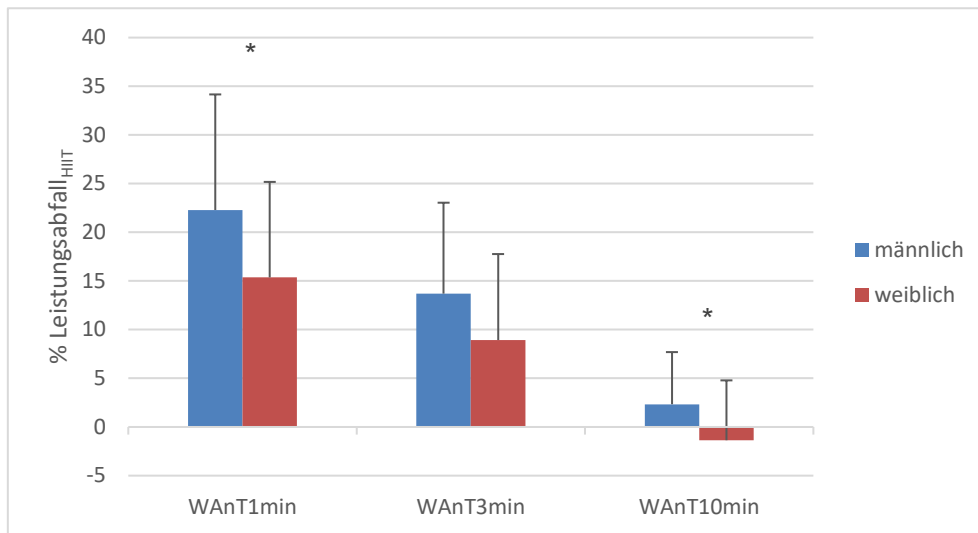


Abb. 36. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls vom ersten zum vierten WAnT zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.  
\* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

Weiterhin ist keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Geschlecht festzustellen, Greenhouse–Geisser  $F(1,57; 70,63) = 0,78$ ,  $p = 0,44$ , partielles  $\eta^2 = 0,17$ . Eine Auswertung mittels ANOVA nach Greenhouse-Geisser-Korrektur zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden  $F(1,57; 70,63) = 97,44$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,68$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-Hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,001$ ) zwischen allen drei Testprotokollen (s. Tab. 15). Abschließend lässt sich festhalten, dass ein signifikanter Haupteffekt des Geschlechts auftritt, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 45) = 5,88$ ,  $p = 0,019$ , partielles  $\eta^2 = 0,015$ .

Tab. 15. Ergebnisse des Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für den Innersubjektfaktor %Leistungsabfall

(I)Pausenzeit	(J)Pausenzeit	Mittlere Differenz (I-J)	Standard Fehler	Sig.	95% Konfidenzintervall für die Differenz	
					Untergrenze	Obergrenze
WAnT1min	WAnT3min	7,513	1,092	,000	4,797	10,229
	WAnT10min	18,339	1,628	,000	14,290	22,387
WAnT3min	WAnT10min	10,825	1,179	,000	7,894	13,757

### 5.1.3 Belastungs- und Erholungsherzfrequenzverhalten

Im Folgenden werden sowohl die durchschnittlichen Belastungs- als auch Erholungsherzfrequenzen für die unterschiedlichen aktiven Regenerationszeiten grafisch dargestellt und statistisch auf Mittelwertunterschiede überprüft. Die Darstellung erfolgt sowohl für den Ruhewert, die Belastungsherzfrequenzen am Ende des jeweiligen WAnTs, die aktive Pausenzeit zwischen den 30-sekündigen Belastungen sowie für die 15-minütige Erholungsphase. Für die aktive Pausenzeit wird bei einer Regeneration von drei und zehn Minuten sowohl die Erholungsherzfrequenz für die erste als auch die dritte bzw. zehnte Minute dargestellt. Des Weiteren wird die prozentuale Erholung des Herz-Kreislauf-Systems nach kurzer hochintensiver Belastung geschlechtsspezifisch gegenübergestellt und analysiert. Unabhängig von der aktiven Regenerationszeit zeigt sich, dass die weiblichen Probanden zu allen Messzeitpunkten im Mittel eine höhere Herzfrequenz aufgewiesen haben als die männlichen Sportler. Bei differenzierter Betrachtung der Ergebnisse weisen die Mittelwertunterschiede bei einer aktiven Pausenzeit von einer Minute zwischen den jeweiligen WAnTs nur an den Messzeitpunkten E6 ( $123,26 \pm 15,47$  vs.  $132,24 \pm 13,37$  S/min;  $p = 0,0497$ ), E9 ( $123,96 \pm 14,39$  vs.  $132,24 \pm 13,42$  S/min;  $p = 0,0494$ ) und E15 ( $125,38 \pm 14,79$  vs.  $134,38 \pm 14,74$  S/min;  $p = 0,0436$ ) Signifikanzen auf (s. Abb. 37).

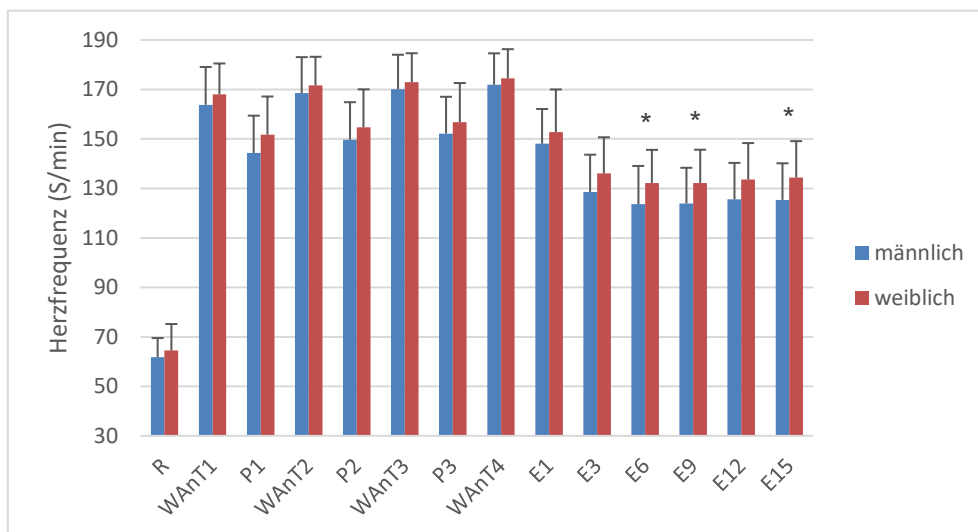


Abb. 37. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von einer Minute (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

Die Erholung des Herz-Kreislauf-Systems bei gleichem Testprotokoll zeigt im Mittel bei den männlichen Probanden zu allen Messzeitpunkten einen deutlich höheren prozentualen Abfall der Herzfrequenz. Sowohl in den jeweiligen Pausenzeiten nach

dem WAnT (P1, P2, P3) als auch in der abschließenden aktiven Erholungsphase von 15 Minuten kommt es zu größeren Veränderungen der Herzfrequenz (s. Abb. 38). Die dabei entstehenden Mittelwertunterschiede zwischen Männern und Frauen sind an den Messzeitpunkten E6 ( $28,22 \pm 5,56$  vs.  $24,24 \pm 5,63$  %;  $p = 0,019$ ), E9 ( $27,97 \pm 5,16$  vs.  $24,22 \pm 5,91$  %;  $p = 0,025$ ), E12 ( $27,04 \pm 5,35$  vs.  $23,46 \pm 6,49$  %;  $p = 0,044$ ) und E15 ( $27,14 \pm 5,53$  vs.  $23,00 \pm 6,79$  %;  $p = 0,026$ ) signifikant. Vor allem bei den weiblichen Probanden steigt die durchschnittliche Herzfrequenz zwischen Minute 12 und 15 noch einmal leicht an.

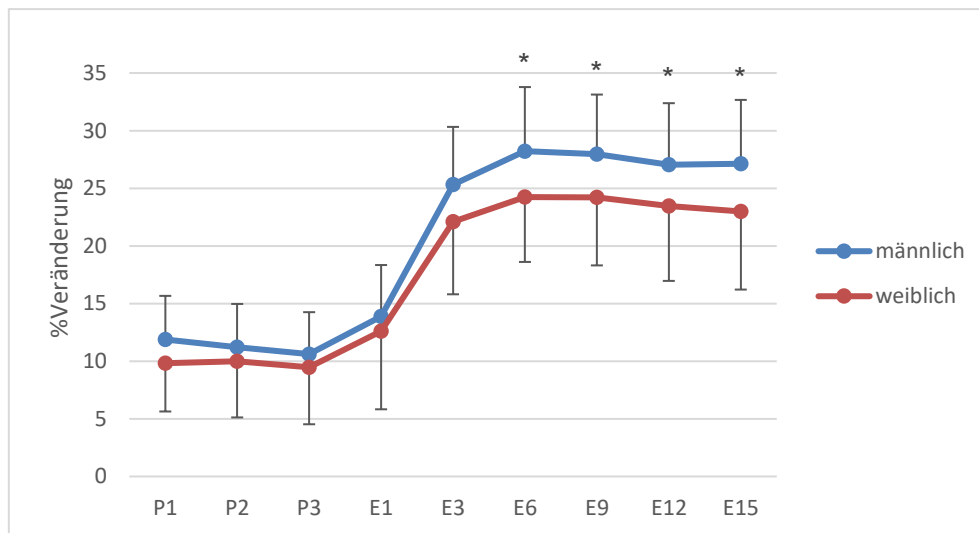


Abb. 38. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von einer Minute nach den WAnTs (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

Bei einer verlängerten aktiven Regenerationszeit von drei Minuten werden die Geschlechtsunterschiede sowohl in der Belastungs- als auch Erholungsherzfrequenz ebenfalls sichtbar (s. Abb. 39). Dabei kommt es zu signifikanten Mittelwertunterschieden in den Pausenmesszeitpunkten P1\_1 ( $136,65 \pm 16,67$  vs.  $147,81 \pm 17,56$  S/min;  $p = 0,03$ ), P2\_3 ( $130,65 \pm 14,83$  vs.  $141,10 \pm 18,02$  S/min;  $p = 0,03$ ), P3\_3 ( $134,14 \pm 14,68$  vs.  $143,57 \pm 17,15$  S/min;  $p = 0,049$ ) sowie den Erholungsmesszeitpunkten E6 ( $126,42 \pm 14,50$  vs.  $136,15 \pm 15,66$  S/min;  $p = 0,03$ ), E9 ( $127,69 \pm 14,72$  vs.  $137,80 \pm 16,23$  S/min;  $p = 0,03$ ), E12 ( $128,27 \pm 14,94$  vs.  $138,60 \pm 16,27$  S/min;  $p = 0,03$ ) und E15 ( $127,65 \pm 14,04$  vs.  $138,45 \pm 15,77$  S/min;  $p = 0,02$ ).

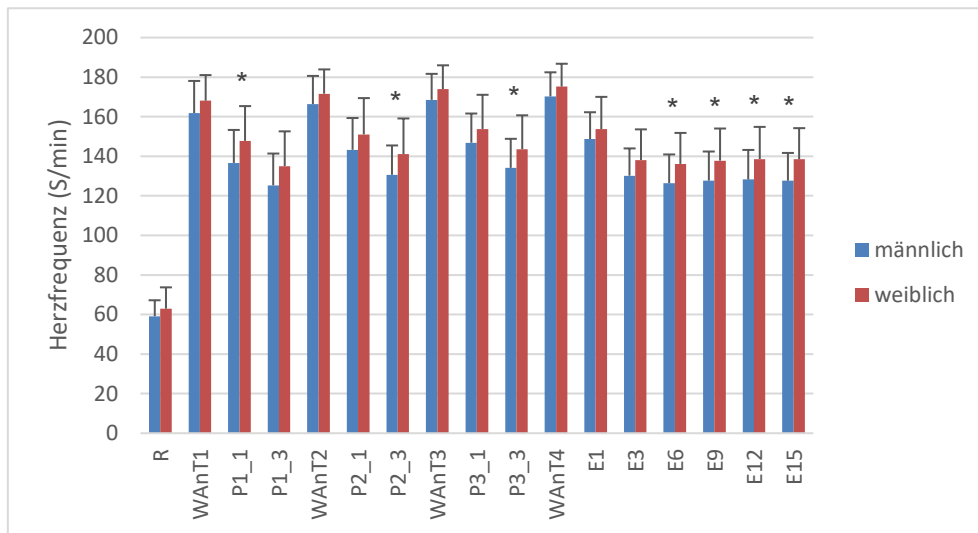


Abb. 39. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von drei Minuten (P1\_1, P1\_3, P2\_1, P2\_3, P3\_1, P3\_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

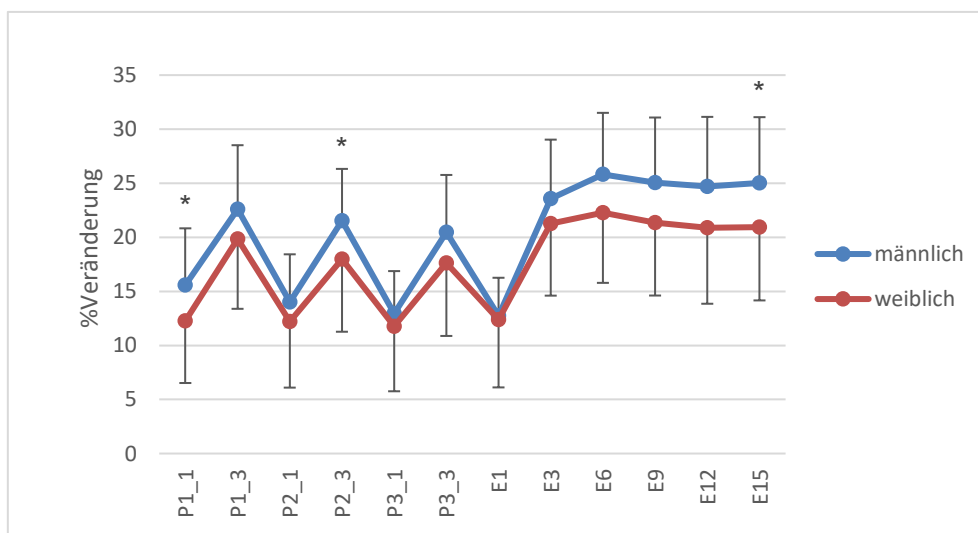


Abb. 40. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von drei Minuten nach den WAnTs (P1\_1, P1\_3, P2\_1, P2\_3, P3\_1, P3\_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

Die Geschlechtsunterschiede in der durchschnittlichen Herzfrequenz sind ebenfalls im mittleren Absinken der Herzfrequenz während der aktiven Pausenzeit sowie der Erholungsphase sichtbar (s. Abb. 40). Die männlichen Probanden weisen, wie bereits bei der kurzen Pausenzeit von einer Minute, zu allen Messzeitpunkten einen höheren prozentualen Abfall der Herzfrequenz auf. Anders als bei der kurzen Regenerationszeit sind die Mittelwertunterschiede innerhalb der Pausenzeit zu den Messzeitpunkten P1\_1 ( $15,59 \pm 5,24$  vs.  $12,25 \pm 5,73$  %;  $p = 0,04$ ) und P2\_3 ( $21,55$

$\pm 4,78$  vs.  $17,98 \pm 6,72$  %;  $p = 0,039$ ) signifikant. Die geschlechtsspezifischen Differenzen der Erholung des Herz-Kreislauf-Systems weisen teils deutliche Tendenzen in der 15-minütigen Erholungsphase auf. Allerdings ist lediglich der Mittelwertunterschied zum Messzeitpunkt E15 ( $25,03 \pm 6,08$  vs.  $20,95 \pm 6,78$  %;  $p = 0,037$ ) als signifikant anzusehen. Ebenfalls ist das Phänomen ersichtlich, dass vor allem die mittlere Herzfrequenz der weiblichen Probanden gegen Ende der Erholungsphase noch einmal leicht ansteigt.

Im Testprotokoll mit der längsten aktiven Pausenzeit zwischen den einzelnen WAnTs kommt es ebenfalls zu signifikanten Geschlechtsunterschieden in der durchschnittlichen Herzfrequenz (s. Abb. 41). Vor allem in der 15-minütigen Erholungsphase sind die mittleren Herzfrequenzen zu den Messzeitpunkten E6 ( $125,77 \pm 14,05$  vs.  $134,67 \pm 14,29$  S/min;  $p = 0,04$ ), E9 ( $127,31 \pm 13,98$  vs.  $137,33 \pm 13,28$  S/min;  $p = 0,02$ ), E12 ( $128,19 \pm 14,45$  vs.  $137,24 \pm 13,81$  S/min;  $p = 0,03$ ) und E15 ( $128,04 \pm 13,73$  vs.  $137,33 \pm 13,72$  S/min;  $p = 0,03$ ) bei den Männern signifikant geringer. Innerhalb der Belastungswerte gibt es keinen signifikanten Unterschied. Auch in den Pausenzeiten kommt es zu keinen statistischen Differenzen zwischen männlichen und weiblichen Probanden. Lediglich der Pausenmesszeitpunkt P1\_10 ( $122,15 \pm 13,53$  vs.  $131,95 \pm 13,86$  S/min;  $p = 0,02$ ) weist eine Signifikanz auf.

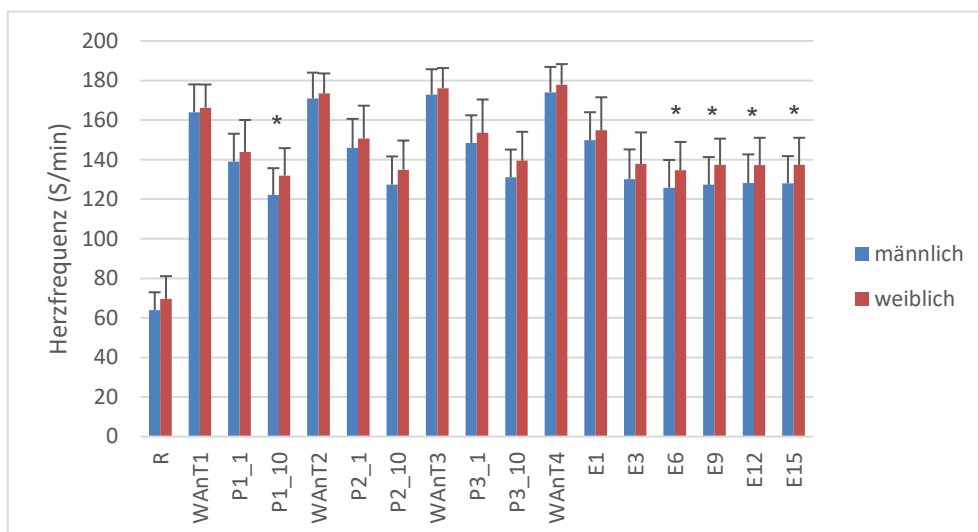


Abb. 41. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von zehn Minuten (P1\_1, P1\_10, P2\_1, P2\_10, P3\_1, P3\_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

Bei der Betrachtung des prozentualen Abfalls der Herzfrequenz nach kurzer hochintensiver Belastung weisen die männlichen Probanden, wie bereits bei kurzer und mittellanger Regenerationsphase, zu allen Messzeitpunkten eine teils deutlich größere Erholung des Herz-Kreislauf-Systems auf (s. Abb. 42). Die Mittelwertunterschiede während der aktiven Pausenzeiten weisen statistische

Tendenzen auf, sind allerdings nur zum Messzeitpunkt P1\_10 ( $25,45 \pm 5,82$  vs.  $20,68 \pm 5,59$ ;  $p = 0,007$ ) sowie P3\_10 ( $24,22 \pm 5,23$  vs.  $20,92 \pm 5,76$  %;  $p = 0,046$ ) als signifikant anzusehen. Anders stellt sich die geschlechtsspezifische Differenz des Abfalls der Herzfrequenz innerhalb der 15-minütigen Erholungsphase dar. Hier weisen die Mittelwertunterschiede der Messwerte E6 ( $27,81 \pm 4,83$  vs.  $24,40 \pm 5,31$  %;  $p = 0,026$ ), E9 ( $26,91 \pm 4,78$  vs.  $22,88 \pm 4,59$  %;  $p = 0,005$ ), E12 ( $26,39 \pm 5,43$  vs.  $22,93 \pm 5,22$  %;  $p = 0,03$ ) sowie E15 ( $26,41 \pm 5,69$  vs.  $22,88 \pm 5,09$  %;  $p = 0,03$ ) Signifikanzen auf. Auch bei einer Pausenzeit von zehn Minuten zeigt sich das Phänomen, dass die Herzfrequenz vor allem bei den weiblichen Probanden gegen Ende noch einmal leicht ansteigt.

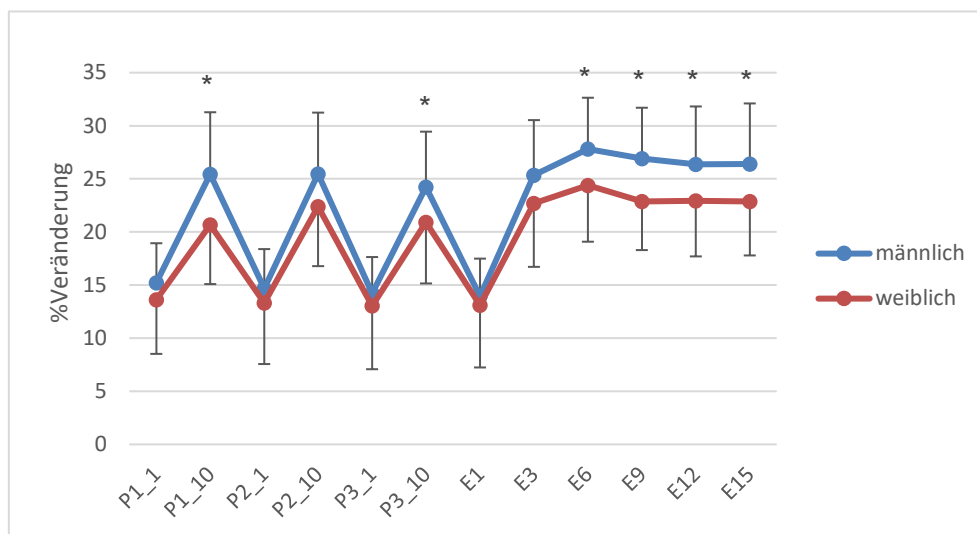


Abb. 42. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von zehn Minuten nach den WAnTs (P1\_1, P1\_10, P2\_1, P2\_10, P3\_1, P3\_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

#### 5.1.4 Laktatverhalten

Im Folgenden werden die durchschnittlichen Laktatkonzentrationen über den kompletten Testverlauf für die unterschiedlichen aktiven Regenerationszeiten von einer, drei und zehn Minuten geschlechtsspezifisch gegenübergestellt und die Mittelwertunterschiede auf Signifikanzen überprüft (s. Abb. 43). Des Weiteren wird die Laktatabbaurate für beide Probandengruppen innerhalb der Nachbelastungsphase hinsichtlich der unterschiedlichen Testprotokolle dargestellt (s. Abb. 44). Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird ersichtlich, dass die männlichen Probanden, unabhängig von der Pausenzeit zwischen den einzelnen WAnTs, über den Testverlauf höhere Laktatkonzentrationen aufweisen als die weiblichen Sportler. Die durchschnittlich höchste Blutlaktatkonzentration erreichen die männlichen Probanden in allen drei Testdesigns drei Minuten nach dem letzten



WAnT (E3). Die dabei erreichten mittleren maximalen Laktatkonzentrationen weisen bei dem Testdesign mit drei Minuten aktiver Regenerationszeit die höchsten durchschnittlichen Laktatkonzentrationen auf ( $15,25 \pm 3,27$  mmol/l), gefolgt von dem Testdesign mit einer Minute aktiver Pause ( $14,79 \pm 2,35$  mmol/l) sowie dem Testprotokoll mit 10-minütiger Regenerationsphase zwischen den einzelnen WAnTs ( $11,78 \pm 2,05$  mmol/l). Im Unterschied dazu sind bei den weiblichen Sportler bei einer Pausenzeit von einer und drei Minuten die höchsten Laktatwerte direkt nach dem vierten WAnT ( $13,15 \pm 2,78$  mmol/l;  $13,51 \pm 3,59$  mmol/l) zu verzeichnen. Lediglich bei dem Testprotokoll mit 10-minütiger Regenerationszeit ist der Messzeitpunkt E3 ( $9,31 \pm 3,22$  mmol/l) der durchschnittlich höchste Wert. Wie auch bei den männlichen Probanden erreichen die Frauen bei dem Testdesign mit drei Minuten Pausenzeit die höchsten Laktatkonzentrationen, gefolgt von dem Testprotokoll mit einer Minute aktiver Regeneration zwischen den WAnTs und dem Testdesign mit 10-minütiger Pausengestaltung. Die differenzierte Betrachtung der Laktatkonzentrationen für die jeweilige Pausenzeit zeigt teils deutliche Unterschiede. Das Testdesign mit einer Minute aktiver Erholung zwischen den WAnTs ergibt in der Belastungsphase keinen signifikanten Unterschied. Der Verlauf der mittleren Laktatkonzentration ist sehr kongruent. Deutliche geschlechtsspezifische Differenzen ergeben sich in der 15-minütigen Erholungsphase. Die ermittelten durchschnittlichen Laktatkonzentrationen zu den Messzeitpunkten E3 ( $14,79 \pm 2,35$  vs.  $12,97 \pm 2,86$  mmol/l;  $p = 0,02$ ), E6 ( $13,61 \pm 2,35$  vs.  $11,45 \pm 2,74$  mmol/l;  $p = 0,005$ ), E9 ( $11,94 \pm 2,41$  vs.  $9,38 \pm 3,11$  mmol/l;  $p = 0,003$ ), E12 ( $9,82 \pm 2,48$  vs.  $7,86 \pm 3,17$  mmol/l;  $p = 0,02$ ) und E15 ( $7,58 \pm 2,49$  vs.  $6,00 \pm 2,67$  mmol/l;  $p = 0,04$ ) weisen signifikante Mittelwertunterschiede auf (s. Abb. 43 A). Werden die Pausenzeiten zwischen den WAnTs auf drei Minuten verlängert, zeigt sich eine ähnliche Tendenz im Verlauf der mittleren Laktatkonzentrationen zwischen Männern und Frauen. Innerhalb der Belastungsphase treten geringe Mittelwertunterschiede auf, welche nicht signifikant sind. Auch bei diesem Testdesign sind erst in der 15-minütigen Erholungsphase starke Unterschiede ersichtlich. Die durchschnittlichen Laktatkonzentrationen zu den Messzeitpunkten E6 ( $13,82 \pm 3,51$  vs.  $11,28 \pm 3,46$  mmol/l;  $p = 0,018$ ), E9 ( $11,66 \pm 3,38$  vs.  $9,36 \pm 3,43$  mmol/l;  $p = 0,03$ ) und E12 ( $9,67 \pm 3,15$  vs.  $7,61 \pm 3,41$  mmol/l;  $p = 0,04$ ) zeigen dabei signifikante Mittelwertunterschiede zwischen beiden Geschlechtern auf (s. Abb. 43 B). Die deutlichsten geschlechtsspezifischen Differenzen werden bei dem Testprotokoll mit zehn Minuten aktiver Pause sichtbar. Sowohl in der Belastungs- als auch Erholungsphase treten teils hochsignifikante Mittelwertunterschiede in den mittleren Laktatkonzentrationen zwischen männlichen und weiblichen Probanden auf. Im Unterschied zu den Testprotokollen mit kurzen und mittellangen Pausenzeiten ist bei dem Testdesign mit 10-minütiger aktiver Regenerationszeit die Laktatkonzentration zusätzlich in der Pause ermittelt worden. Die dabei auftretenden Mittelwertunterschiede zu den Messzeitpunkten P1 ( $7,48 \pm 1,95$  vs.  $5,14 \pm 2,01$  mmol/l;  $p < 0,001$ ), P2 ( $8,26 \pm 2,29$  vs.  $5,72 \pm 2,57$  mmol/l;  $p = 0,008$ ) und P3 ( $9,10 \pm 2,56$  vs.  $6,40 \pm 2,86$  mmol/l;  $p < 0,001$ ) sind als signifikant bzw. hochsignifikant anzusehen. Zusätzlich ergibt sich ein signifikanter Unterschied bei

den mittleren Laktatkonzentrationen nach dem WAnT 3 ( $9,11 \pm 2,26$  vs.  $7,48 \pm 2,49$  mmol/l;  $p = 0,02$ ) und WAnT 4 ( $9,67 \pm 2,48$  vs.  $7,64 \pm 2,49$  mmol/l;  $p = 0,008$ ). Wie bereits bei kurzer und mittellanger Pausengestaltung ergeben sich auch in der 15-minütigen aktiven Erholungsphase teils deutliche Mittelwertunterschiede. Zu den Messzeitpunkten E3 ( $11,78 \pm 2,05$  vs.  $9,31 \pm 3,22$  mmol/l;  $p = 0,002$ ), E6 ( $11,19 \pm 2,57$  vs.  $7,93 \pm 3,34$  mmol/l;  $p < 0,001$ ), E9 ( $9,11 \pm 2,39$  vs.  $6,45 \pm 3,20$  mmol/l;  $p = 0,002$ ), E12 ( $7,36 \pm 2,23$  vs.  $5,01 \pm 2,65$  mmol/l;  $p = 0,002$ ) und E15 ( $6,01 \pm 2,22$  vs.  $4,12 \pm 2,31$  mmol/l;  $p = 0,007$ ) sind die Differenzen in den mittleren Laktatkonzentrationen dabei als signifikant bzw. hochsignifikant anzusehen (s. Abb. 43 C).

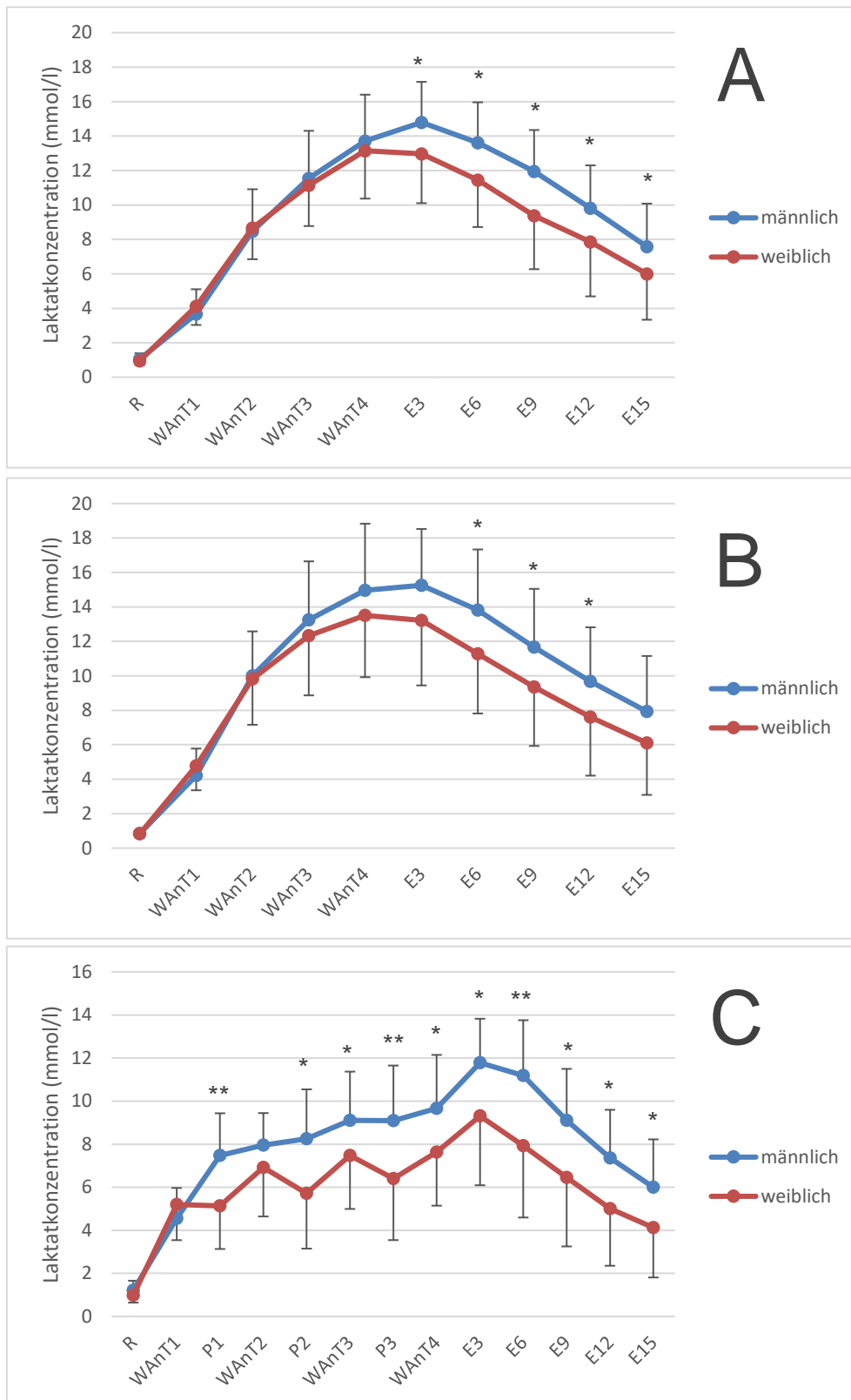


Abb. 43. Durchschnittliche Laktatkonzentration in Ruhe (R), nach den vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen Männern und Frauen bei unterschiedlichen aktiven Pausenzeiten. A: eine Minute Pausenzeit, B: drei Minuten Pausenzeit, C: zehn Minuten Pausenzeit inklusive Laktatkonzentration am Ende der Pause (P1, P2, P3). \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen Männern und Frauen

Bei der Betrachtung des mittleren prozentualen Laktatabbaus innerhalb der 15-minütigen Erholungsphase wird ersichtlich, dass bei allen drei Testprotokollen die weiblichen Probanden durchschnittlich eine höhere Laktatabbaurrate aufweisen als die Männer (s. Abb. 44). Während der Unterschied zwischen beiden Probandengruppen bei einer Minute Pausenlänge nicht signifikant ist ( $49,85 \pm 12,83$  vs.  $56,61 \pm 13,43$  %,  $p = 0,085$ ), zeigen sich bei dem Testprotokoll mit 3-minütiger ( $50,50 \pm 11,34$  vs.  $57,94 \pm 12,97$  %,  $p = 0,044$ ) und 10-minütiger Regenerationszeit ( $50,40 \pm 12,79$  vs.  $58,59 \pm 11,35$  %,  $p = 0,027$ ) signifikante Differenzen zwischen Männern und Frauen. Unter Einbezug der Pausenzeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen ist die mittlere Laktatabbaurrate sowohl innerhalb der Probandengruppe als auch im Vergleich zum anderen Probandenkollektiv nahezu konstant.

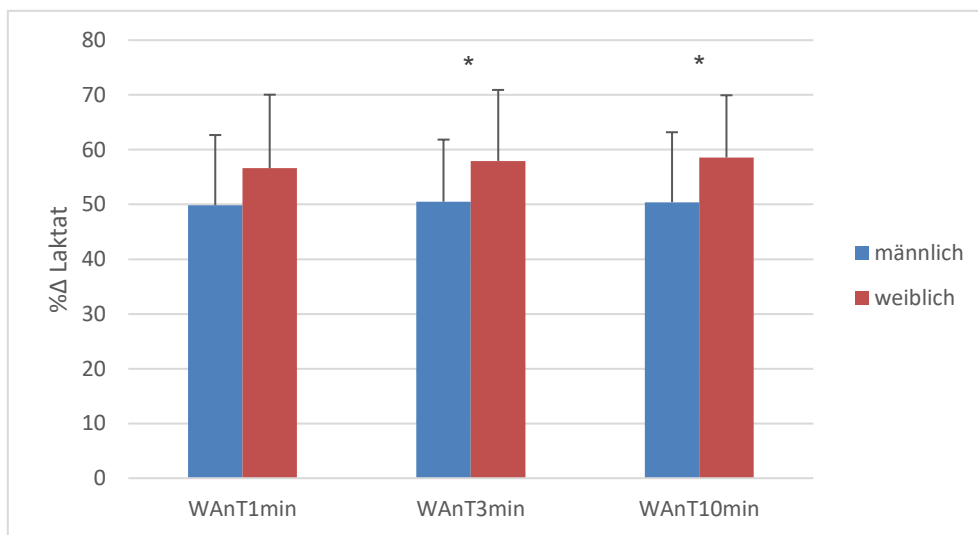


Abb. 44. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Blutlaktatabbaus innerhalb der 15-minütigen aktiven Erholungsphase zwischen Männern und Frauen bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen Männern und Frauen

## 5.2 Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf abhängige Untersuchungsvariablen

Für die Auswertung, inwiefern die Ausdauerleistungsfähigkeit einen Einfluss auf die Belastungs- und Regenerationskinetik nach lokomotorischen Intervallbelastungen hat, wurden insgesamt 31 Probanden in die Ergebnisdarstellung einbezogen. Auf Grundlage der ermittelten  $VO_{2max}$ -Werte und deren Perzentile ist das Probandenkollektiv in die Gruppe *Sehr gut ausdauertrainierte Sportler* ( $n = 18$ ) und *Gut ausdauertrainierte Sportler* ( $n = 13$ ) eingeteilt worden. Die Geschlechterverteilung in den beiden Gruppen ist dabei nicht signifikant ( $p = 0,073$ ). Anhand der detaillierten Charakterisierung der Probandengruppe zeigen sich signifikante Mittelwertunterschiede in der Fettmasse ( $p = 0,04$ ), der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme ( $p < 0,001$ ) sowie dem Perzentil der  $VO_{2max}$  ( $p < 0,001$ ). Alle weiteren Parameter unterscheiden sich nicht signifikant zwischen beiden Probandengruppen (s. Tab. 16).

Tab. 16. Ausdauerspezifische Charakterisierung des Probandenkollektivs

	sehr gut trainiert		gut trainiert	
	MW	SD	MW	SD
Größe (m)	1,78	0,07	1,73	0,09
Gewicht (kg)	69,29	9,01	70,42	13,13
Alter (J)	34,00	11,47	37,92	15,69
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	22,04	2,18	23,38	3,11
Sport pro Woche (h)	9,17	3,70	8,00	2,77
FM (%)	11,81	6,80	17,31	7,16*
Magermasse (kg)	61,38	8,15	56,18	15,73
HF <sub>max</sub> (S/min)	180,78	11,56	174,62	13,09
VO <sub>2max</sub> (ml/min/kg)	57,50	5,20	42,21	4,79**
KUADC Perzentil VO <sub>2max</sub>	97,96	1,15	72,04	14,96**

\* $p < 0,05$  und \*\* $p < 0,001$

### 5.2.1 Physikalische Leistung, Ermüdung sowie Erholung

In dem folgenden Abschnitt werden die Mittelwerte der maximalen Leistung, der durchschnittlichen Leistung sowie der prozentuale Leistungsabfall für jeden einzelnen WAnT und die unterschiedlichen aktiven Regenerationszeiten tabellarisch und grafisch dargestellt. Die Mittelwertunterschiede zwischen beiden Probandengruppen sind zusätzlich auf Signifikanzen überprüft worden. Unabhängig von der Pausenlänge zeigt sich, dass die sehr gut ausdauertrainierten Probanden sowohl in der maximalen als durchschnittlichen Leistung in allen WAnTs höhere Werte im Mittel erzielt haben. Ebenfalls besteht ein großer Unterschied bei dem prozentualen Leistungsabfall innerhalb des jeweiligen WAnTs. Der Leistungsabfall ist in allen 30-sekündigen All-Out-Tests deutlich höher bei den gut ausdauertrainierten Probanden. Bei differenzierter Betrachtung der einzelnen

Testprotokolle ist bei 1-minütiger Regenerationszeit zwischen den einzelnen WAnTs bei beiden Gruppen ein stetiger Abfall der mittleren maximalen als auch durchschnittlichen Leistung über den Testverlauf ersichtlich. Der Leistungsabfall innerhalb des jeweiligen WAnTs ist bei beiden Stichproben im ersten Durchgang am höchsten. Die sehr gut Ausdauertrainierten sind in den Versuchen zwei bis vier in der Lage den prozentualen Leistungsabfall nahezu stabil zu halten, währenddessen bei den gut ausdauertrainierten Probanden eine deutlichere Schwankung auftritt (s. Tab. 17).

Tab. 17. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit einer Minute Pausenzeit von sehr gut und gut ausdauertrainierten Probanden

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
sehr gut trainiert	10,76	2,38	8,91	1,52	8,46	1,24	7,99	0,96
gut trainiert	9,55	1,66	7,42	0,75	6,78	0,79	6,71	1,21
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
sehr gut trainiert	7,94	1,50	6,99	1,07	6,58	0,94	6,30	0,89
gut trainiert	5,85	1,01	4,87	0,66	4,54	0,61	4,48	0,57
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
sehr gut trainiert	25,26	8,78	20,97	6,99	21,91	6,57	21,06	6,60
gut trainiert	38,24	7,23	34,39	6,47	32,86	6,21	32,34	7,97

Die in Abbildung 45 dargestellten Mittelwertunterschiede der maximalen Leistung für den jeweiligen WAnT von  $10,76 \pm 2,38$  vs.  $9,55 \pm 1,66$  W/kg ( $p = 0,12$ );  $8,91 \pm 1,52$  vs.  $7,42 \pm 0,75$  W/kg ( $p = 0,003$ );  $8,46 \pm 1,24$  vs.  $6,78 \pm 0,79$  W/kg ( $p < 0,001$ ) und  $7,99 \pm 0,96$  vs.  $6,71 \pm 1,21$  W/kg ( $p = 0,002$ ) sind im zweiten, dritten und vierten Durchgang signifikant bzw. hochsignifikant. Ein stetiger Abfall der maximalen Leistung über den Testverlauf ist in beiden Gruppen zu verzeichnen.

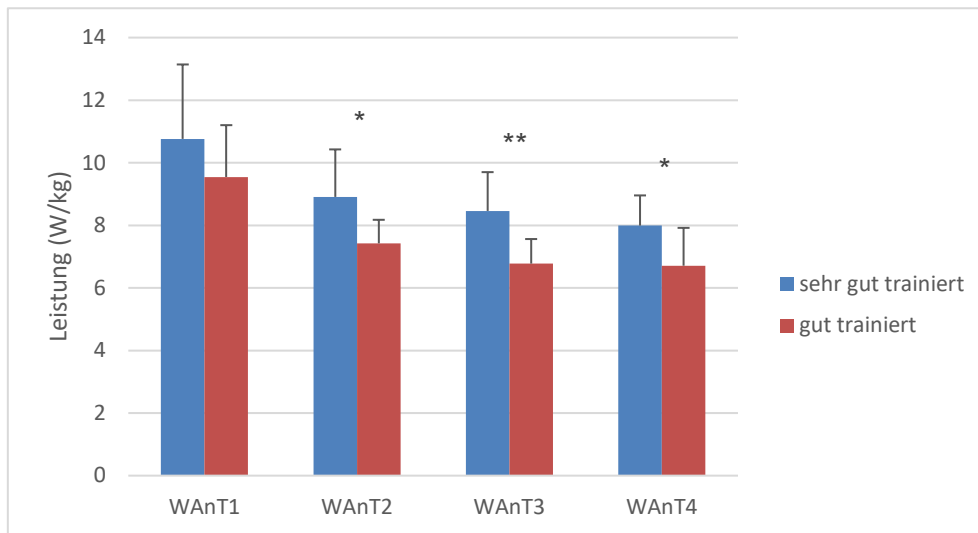


Abb. 45. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Im Folgenden wird die Erholungsfähigkeit der Muskulatur, in Form der Reproduzierbarkeit der maximalen Leistung im Vergleich zum vorangegangenen WAnT genauer beleuchtet (s. Abb. 46). Die sehr gut ausdauertrainierten Sportler kommen in dem WAnT2 und WAnT3 prozentual näher an ihre maximale Leistung aus dem vorangegangenen 30-sekündigen All-Out-Test heran, währenddessen die gut ausdauertrainierten Probanden im letzten WAnT eine bessere Reproduzierbarkeit der maximalen Leistung aufweisen. Des Weiteren nimmt die prozentuale Erholung von WAnT zu WAnT bei den gut Ausdauertrainierten zu. Die mittleren prozentualen Veränderungen von  $84,46 \pm 13,83$  vs.  $78,99 \pm 8,52$  % ( $p = 0,22$ ),  $96,05 \pm 12,66$  vs.  $91,34 \pm 6,02$  % ( $p = 0,22$ ) sowie  $95,17 \pm 8,96$  vs.  $99,16 \pm 14,23$  % ( $p = 0,35$ ) ergeben dabei allerdings keine signifikanten Mittelwertunterschiede.

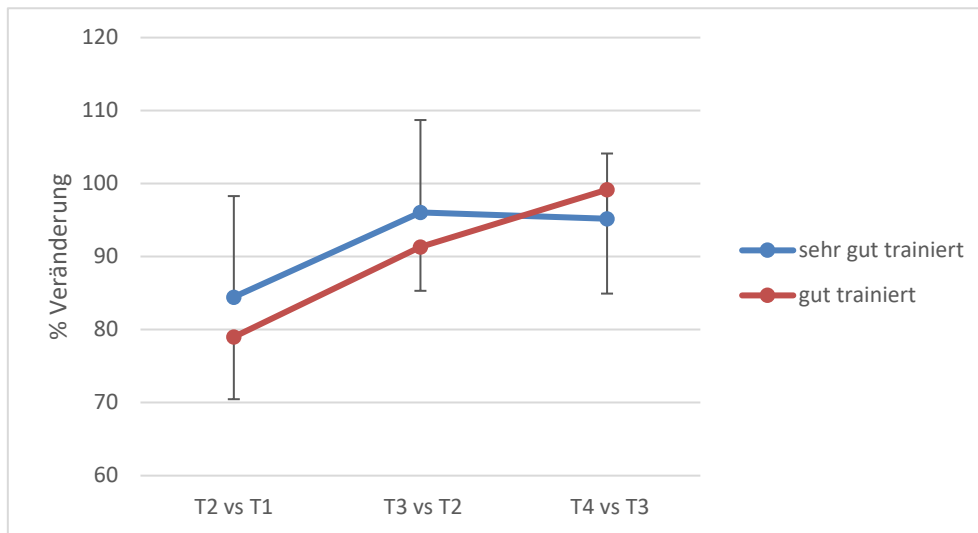


Abb. 46. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Wie bereits bei der maximalen Leistung ist auch bei der durchschnittlichen Leistung eine große Differenz zwischen beiden Stichproben erkennbar. Die sehr gut ausdauertrainierten Probanden erreichen in allen vier Ausbelastungstests im Mittel höhere Werte als die gut Ausdauertrainierten (s. Abb. 47). Die dabei entstehenden Mittelwertunterschiede von  $7,94 \pm 1,50$  vs.  $5,85 \pm 1,01$  W/kg ( $p < 0,001$ ),  $6,99 \pm 1,07$  vs.  $4,87 \pm 0,66$  W/kg ( $p < 0,001$ ),  $6,58 \pm 0,94$  vs.  $4,54 \pm 0,61$  W/kg ( $p < 0,001$ ) sowie  $6,30 \pm 0,89$  vs.  $4,48 \pm 0,57$  W/kg ( $p < 0,001$ ) sind als hochsignifikant anzusehen. Weiterhin zeigt sich, dass die höchste durchschnittliche Leistung in beiden Gruppen im ersten WAnT erzielt werden konnte und dann von Versuch zu Versuch abnimmt.

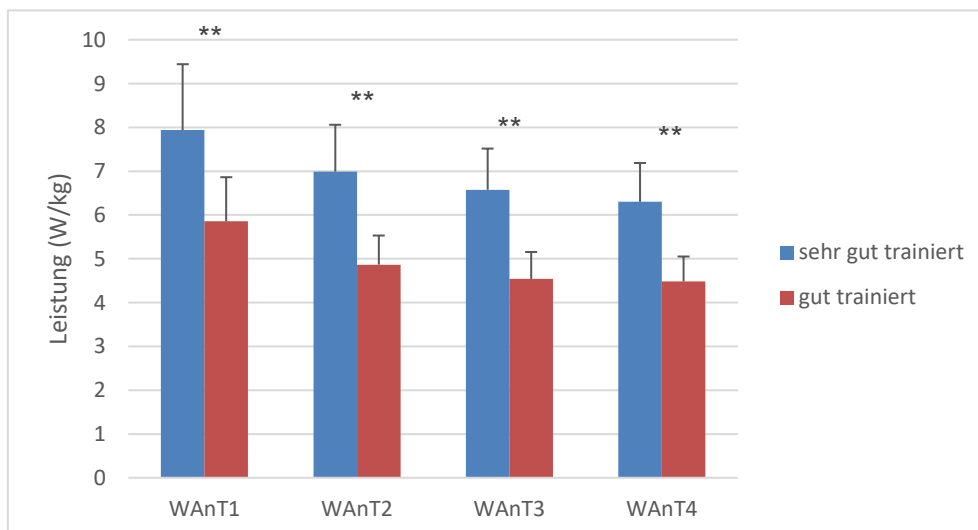


Abb. 47. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern



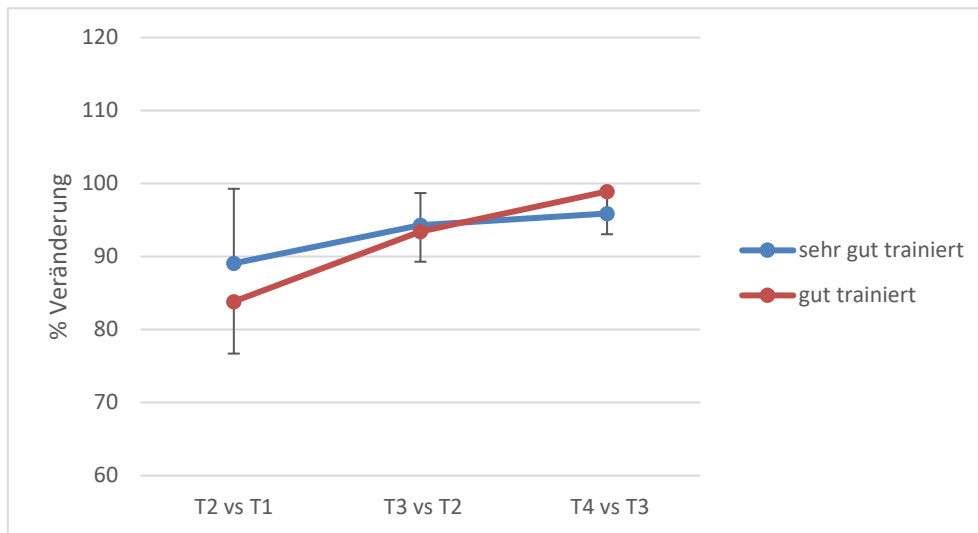


Abb. 48. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Bei der Erholungsfähigkeit der Muskulatur, in Form der Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Leistung bezogen auf den vorangegangenen WAnT zeigt sich ein ähnliches Bild wie bereits bei der maximalen Leistung. Auch hier ist die Gruppe der sehr gut ausdauertrainierten Probanden in den WAnT2 und WAnT3 in der Lage den Leistungsabfall im Vergleich zum vorangegangenen Test geringer zu halten, währenddessen das Probandenkollektiv der gut Ausdauertrainierten im vierten WAnT eine bessere Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Leistung aufweisen kann (s. Abb. 48). Die Mittelwertunterschiede von  $89,08 \pm 10,21$  vs.  $83,85 \pm 7,13$  % ( $p = 0,12$ ),  $94,32 \pm 4,39$  vs.  $93,42 \pm 4,13$  % ( $p = 0,57$ ) sowie  $95,91 \pm 3,27$  vs.  $98,93 \pm 5,86$  % ( $p = 0,08$ ) sind dabei in keinem der Durchgänge signifikant. Wie bereits bei der prozentualen Erholung der maximalen Leistung wird auch hier ersichtlich, dass im zweiten WAnT die größte Differenz in der Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Leistung in beiden Gruppen besteht. Weiterhin zeigt sich auch bei der durchschnittlichen Leistung, dass die gut Ausdauertrainierten eine höhere prozentuale Erholung der Muskulatur in den unteren Extremitäten von WAnT zu WAnT erreichen.

Der prozentuale Leistungsabfall innerhalb des jeweiligen WAnTs weist ebenfalls eine große Differenz zwischen beiden Untersuchungsgruppen auf (s. Abb. 49). Im Mittel ist die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall über die 30 Sekunden Belastung in jedem einzelnen Test bei den sehr gut ausdauertrainierten Probanden höher. Die errechneten Mittelwertunterschiede von  $25,26 \pm 8,78$  vs.  $38,24 \pm 7,23$  % ( $p < 0,001$ );  $20,97 \pm 6,99$  vs.  $34,39 \pm 6,47$  % ( $p < 0,001$ );  $21,91 \pm 6,57$  vs.  $32,86 \pm 6,21$  % ( $p < 0,001$ ) sowie  $21,06 \pm 6,60$  vs.  $32,34 \pm 7,97$  % ( $p < 0,002$ ) sind allesamt als hochsignifikant anzusehen. Bei beiden Gruppen ist im ersten WAnT der höchste Leistungsabfall zu verzeichnen. Anschließend stabilisieren die sehr gut Ausdauertrainierten Leistungsabfall auf einem Niveau,

währenddessen die gut ausdauertrainierten Probanden deutlichere Schwankungen innerhalb der Versuche zwei bis vier aufweisen.

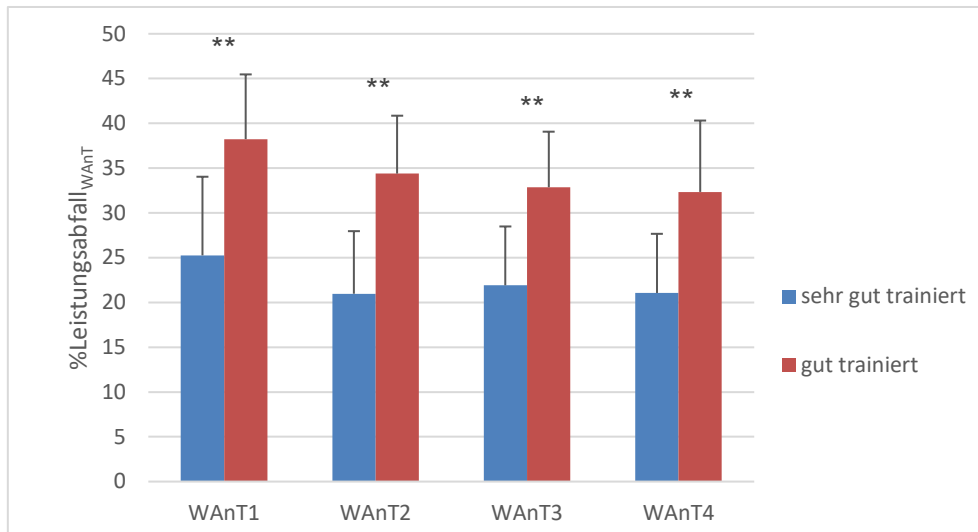


Abb. 49. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Der Zusammenhang zwischen der prozentualen Ermüdung und der Ausdauerleistungsfähigkeit, welche anhand des Perzentils der maximalen Sauerstoffaufnahme bestimmt wurde ist bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen den einzelnen WAnTs als groß einzuschätzen. Der Korrelationskoeffizient beträgt  $r = -0,70$  (s. Abb. 50).

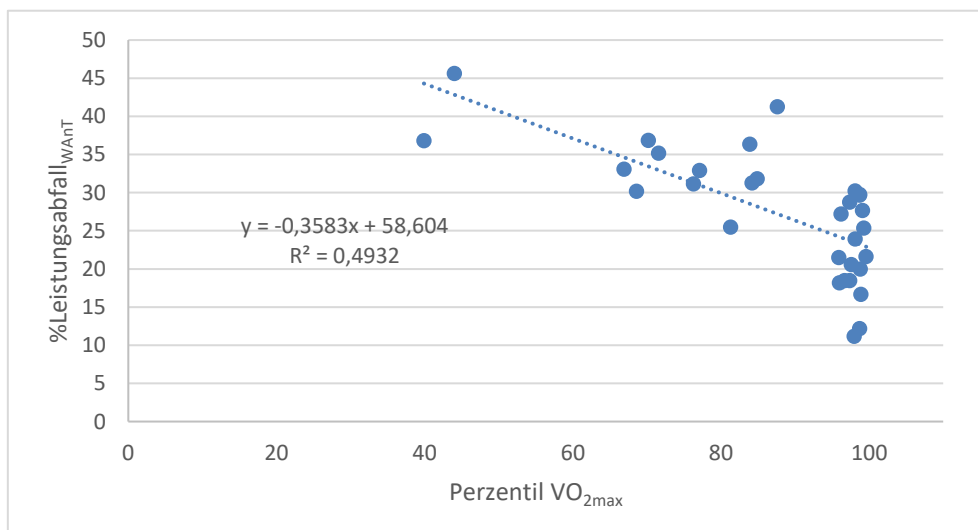


Abb. 50. Korrelation der Ausdauerleistungsfähigkeit (Perzentil VO<sub>2max</sub>) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern

Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall bei 1-minütiger Pausenlänge, bezogen auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zeigt sich, dass bei den sehr gut ausdauertrainierten Probanden ein mittlerer negativer Zusammenhang zwischen beiden Variablen besteht ( $r = -0,30$ ). Bei der Gruppe der gut ausdauertrainierten Sportler ist bei gleichem Testdesign eine große negative Korrelation sichtbar ( $r = -0,51$ ) (s. Abb. 51).

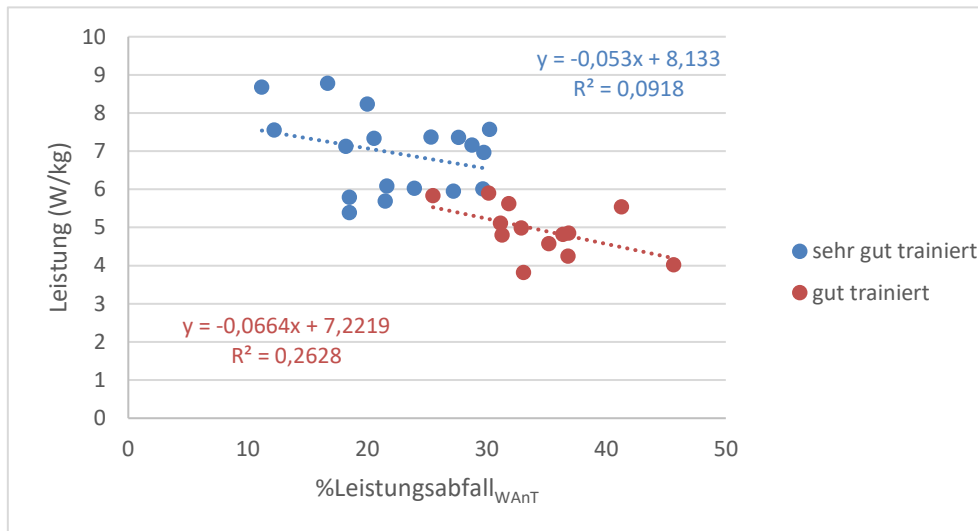


Abb. 51. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern

Bei einer aktiven Pausenzeit von drei Minuten zwischen den einzelnen WAnTs zeichnet sich das gleiche Bild ab, wie es bereits bei 1-minütiger Regenerationszeit dargestellt wurde (s. Tab. 18). Auch bei diesem Testprotokoll erzielen die sehr gut ausdauertrainierten Probanden sowohl in der maximalen als auch der durchschnittlichen Leistung im Mittel deutlich höhere Wattwerte. Der durchschnittliche Leistungsabfall innerhalb der jeweiligen 30-sekündigen All-Out-Tests ist ebenfalls in allen Versuchen geringer als bei den gut trainierten Sportlern. Bei beiden Gruppen kommt es über den kompletten Testverlauf bei maximaler sowie durchschnittlicher Leistung zu einer stetigen Reduzierung der Wattleistung. Der prozentuale Leistungsabfall über die 30 Sekunden Belastung ist bei beiden Stichproben innerhalb des ersten WAnTs am Höchsten, währenddessen der letzte Durchgang den geringsten Prozentwert aufweist.

Tab. 18. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit von sehr gut und gut ausdauertrainierten Probanden

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
sehr gut trainiert	11,19	1,88	10,29	1,77	9,88	1,61	9,27	1,50
gut trainiert	9,34	1,79	8,36	1,37	7,77	1,26	7,50	1,45
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
sehr gut trainiert	8,11	1,44	7,55	1,20	7,23	1,10	7,06	1,04
gut trainiert	5,86	1,08	5,34	0,86	5,02	0,83	4,95	0,73
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
sehr gut trainiert	26,95	9,54	25,63	10,55	26,01	9,82	23,00	9,67
gut trainiert	36,70	9,22	35,43	9,58	34,96	8,10	33,06	8,80

Bei differenzierter Betrachtung der im Mittel erreichten maximalen Leistungen für jeden WAnT sind gravierende Differenzen zwischen den sehr gut ausdauertrainierten Probanden und gut Ausdauertrainierten sichtbar (s. Abb. 52). Die Mittelwertunterschiede der maximalen Leistungen sind in allen vier Durchgängen signifikant bzw. hochsignifikant ( $11,19 \pm 1,88$  vs.  $9,34 \pm 1,79$  W/kg,  $p = 0,0102$ ;  $10,29 \pm 1,77$  vs.  $8,36 \pm 1,37$  W/kg,  $p = 0,003$ ;  $9,88 \pm 1,61$  vs.  $7,77 \pm 1,26$  W/kg,  $p < 0,001$ ;  $9,27 \pm 1,50$  vs.  $7,50 \pm 1,45$  W/kg,  $p < 0,001$ ). Ein stetiger Abfall der maximalen Leistung über den gesamten Testverlauf wird bei beiden Probandengruppen ersichtlich.

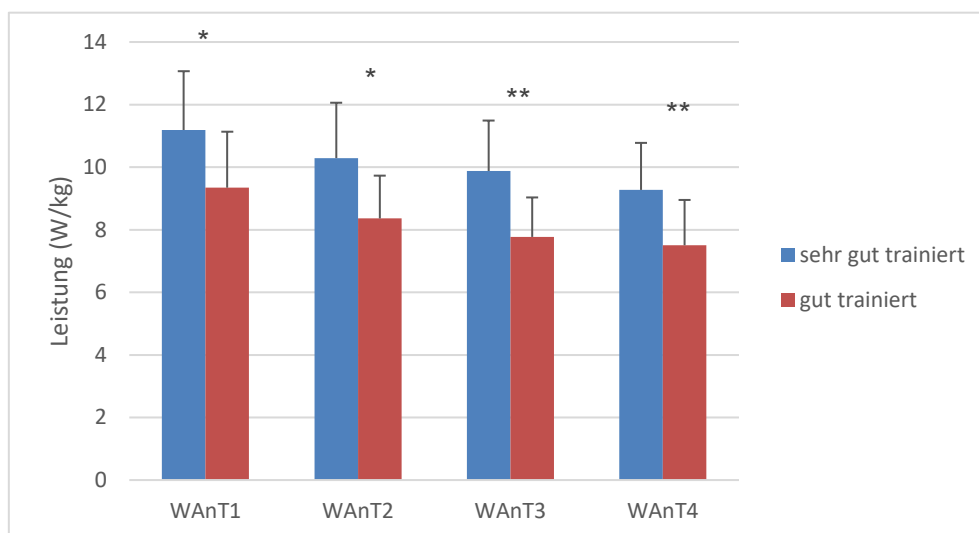


Abb. 52. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

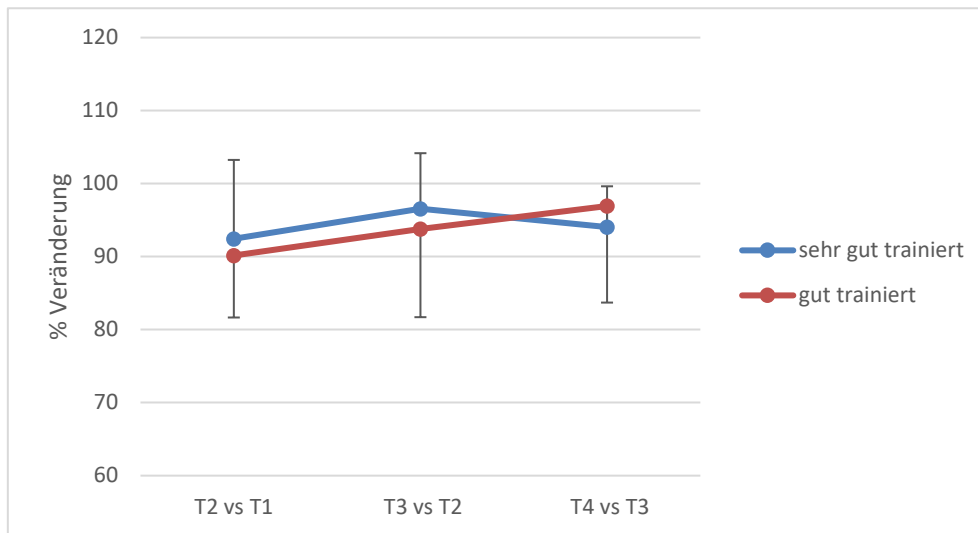


Abb. 53. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Die Erholung der Muskulatur, in Form der prozentualen Veränderung der maximalen Leistung verglichen mit dem vorangegangenen WAnT, lässt erkennen, dass die sehr gut ausdauertrainierten Probanden im zweiten und dritten Durchgang die Leistung auf einem höheren Niveau reproduzieren können, währenddessen die Gruppe der gut ausdauertrainierten Sportler im vierten All-Out-Test eine höhere Wiedergabe der Wattleistung erreichen (s. Abb. 53). Die entstandenen Mittelwertunterschiede von  $92,44 \pm 10,80$  vs.  $90,15 \pm 8,49$  % ( $p = 0,53$ );  $96,56 \pm 7,61$  vs.  $93,78 \pm 12,08$  % ( $p = 0,44$ ) sowie  $94,06 \pm 5,57$  vs.  $96,93 \pm 11,74$  % ( $p = 0,41$ ) sind allerdings in keinem der WAnTs signifikant.

Die detaillierte Betrachtung der durchschnittlichen Leistung sowie der Erholungsfähigkeit der Muskulatur zeigt ein nahezu identisches Bild der Ergebnisse auf. Über alle vier WAnTs erzielten die sehr gut ausdauertrainierten Probanden im Mittel höhere Wattleistungen (s. Abb. 54 und 55). Die Mittelwertunterschiede zwischen beiden Gruppen sind dabei als hochsignifikant einzuschätzen ( $8,12 \pm 1,44$  vs.  $5,86 \pm 1,08$  W/kg,  $p < 0,001$ ;  $7,55 \pm 1,20$  vs.  $5,34 \pm 0,86$  W/kg,  $p < 0,001$ ;  $7,23 \pm 1,10$  vs.  $5,02 \pm 0,83$  W/kg,  $p < 0,001$  und  $7,06 \pm 1,04$  vs.  $4,95 \pm 0,73$  W/kg,  $p < 0,001$ ). Ein stetiger Abfall der durchschnittlichen Leistung im Verlauf der Intervallbelastungen ist ebenfalls zu verzeichnen.

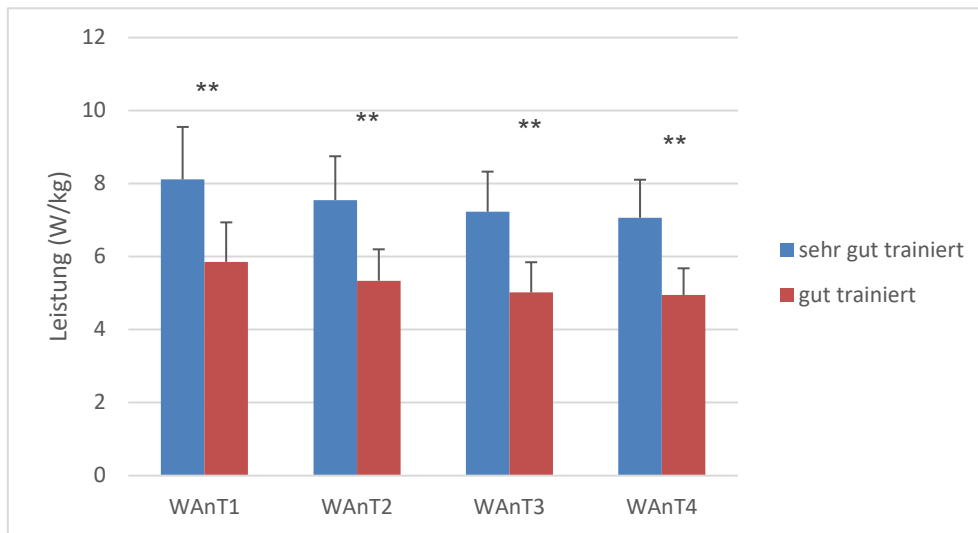


Abb. 54. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Wie bereits bei der maximalen Leistung weisen die sehr gut ausdauertrainierten Sportler eine höhere Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Leistung in dem zweiten und dritten WAnT auf (s. Abb. 55). Weiterhin ist auch bei diesem Parameter die prozentuale Veränderung im Vergleich zum vorangegangenen Test bei den gut ausdauertrainierten Sportlern im vierten Durchgang geringer. Die Mittelwertunterschiede von  $93,47 \pm 5,31$  vs.  $91,72 \pm 5,65$  % ( $p = 0,38$ );  $95,97 \pm 4,17$  vs.  $94,18 \pm 6,26$  % ( $p = 0,35$ ) sowie  $97,79 \pm 1,66$  vs.  $98,98 \pm 4,41$  % ( $p = 0,3$ ) sind allerdings ebenfalls nicht signifikant.

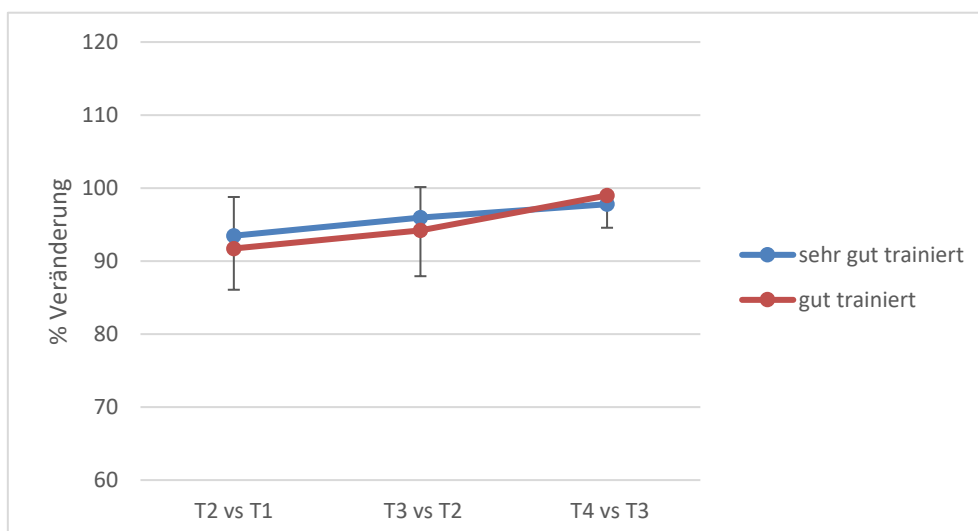


Abb. 55. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

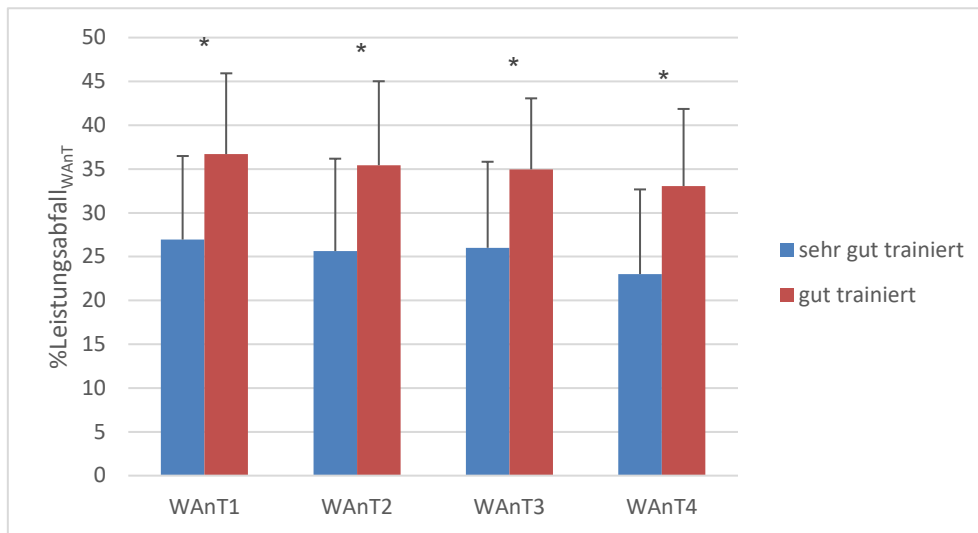


Abb. 56. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Der prozentuale Leistungsabfall bei einer aktiven Pausenzeit von drei Minuten ist ebenfalls durch große Differenzen zwischen beiden Gruppen charakterisiert (s. Abb. 56). Die sehr gut ausdauertrainierten Probanden erzielen in allen vier WAnTs einen geringeren Leistungsabfall über die jeweilige 30-sekündige Belastung. Die Mittelwertunterschiede von  $26,95 \pm 9,54$  vs.  $36,70 \pm 9,22$  % ( $p = 0,008$ );  $25,63 \pm 10,54$  vs.  $35,43 \pm 9,58$  % ( $p = 0,013$ );  $26,01 \pm 9,82$  vs.  $34,96 \pm 8,10$  % ( $p = 0,012$ ) sowie  $23,00 \pm 9,67$  vs.  $33,06 \pm 8,80$  % ( $p = 0,006$ ) sind in allen vier Durchgängen signifikant. Der höchste Leistungsabfall innerhalb des WAnT ist bei beiden Probandengruppen im ersten Durchgang zu verzeichnen. Sowohl die sehr gut ausdauertrainierten Probanden als auch die gut Ausdauertrainierten zeigen über den Testverlauf zwischen dem ersten und dem vierten WAnT im Mittel einen abnehmenden Leistungsabfall auf.

Die grafische Darstellung (s. Abb. 57) der Korrelation zwischen dem prozentualen Leistungsabfall und des ermittelten Perzentils der  $VO_{2max}$  bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen den WAnTs zeigen, dass es einen mittleren negativen Zusammenhang zwischen beiden Variablen gibt ( $r = -0,43$ ).

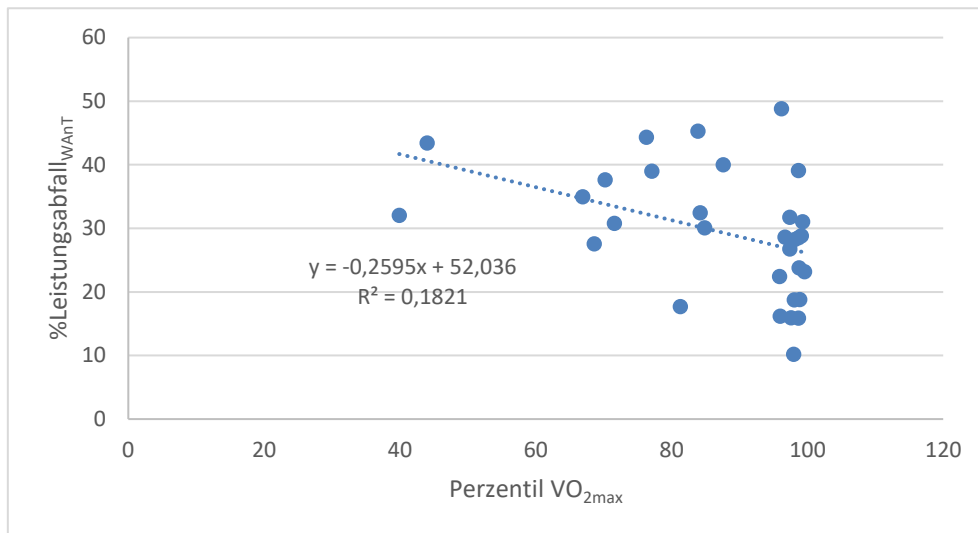


Abb. 57. Korrelation der Ausdauerleistungsfähigkeit (Percentil VO<sub>2max</sub>) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern

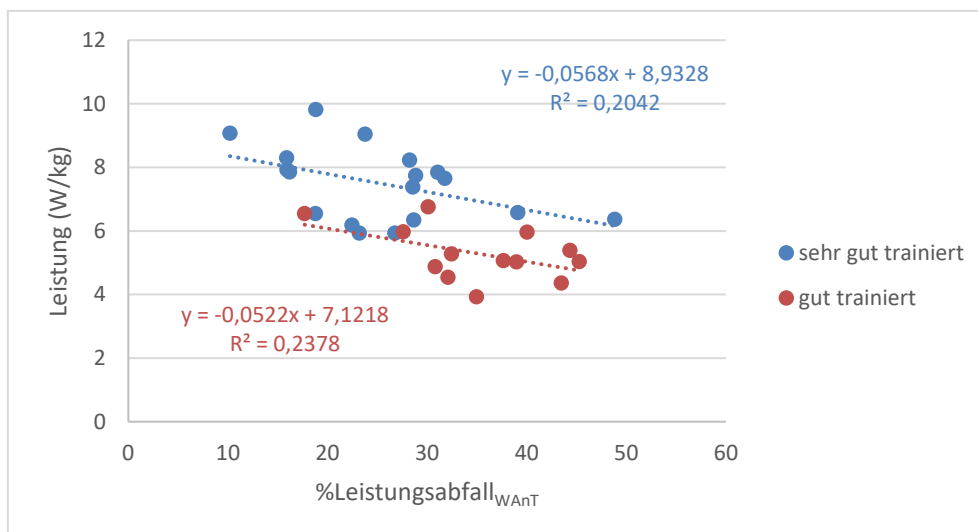


Abb. 58. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern

Zwischen der durchschnittlichen Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenzeit von drei Minuten zwischen den jeweiligen WAnTs zeigt sich bei der Gruppe der sehr gut ausdauertrainierten Probanden ein mittlerer negativer Zusammenhang ( $r = -0,45$ ). Die gut ausdauertrainierten Sportler weisen bei gleichem Testdesign einen großen negativen Zusammenhang zwischen beiden Variablen auf ( $r = -0,51$ ) (s. Abb. 58).



Eine aktive Pausenzeit von zehn Minuten zwischen den einzelnen WAnTs führt ebenfalls zu sichtbaren Differenzen zwischen beiden Gruppen in der maximalen Leistung, der durchschnittlichen Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall in allen vier Durchgängen (s. Tab. 19). Sowohl in der Tretleistung als auch dem %Leistungsabfall<sub>WAnT</sub> weisen die sehr gut ausdauertrainierten Probanden, wie bereits schon bei 1-minütiger und 3-minütiger Regenerationszeit, bessere Werte auf. Beide Gruppen erreichen in dem ersten WAnT im Mittel die höchste maximale und durchschnittliche Wattleistung sowie den höchsten prozentualen Leistungsabfall innerhalb der 30-sekündigen Ausbelastung. Insgesamt sind beide Stichproben in der Lage ihre Leistungen über den kompletten Testverlauf auf einem hohen Niveau, mit geringen Schwankungen zu stabilisieren.

Tab. 19. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit von sehr gut und gut ausdauertrainierten Probanden

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
sehr gut trainiert	10,93	2,08	10,46	2,08	10,28	1,77	10,17	1,53
gut trainiert	9,27	1,60	8,55	1,57	8,73	1,52	8,67	1,33
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
sehr gut trainiert	8,07	1,51	7,94	1,34	7,93	1,30	7,94	1,26
gut trainiert	5,72	1,02	5,70	0,96	5,71	0,96	5,67	0,98
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
sehr gut trainiert	25,64	8,17	23,34	8,19	22,55	5,29	21,58	8,62
gut trainiert	37,91	7,42	32,60	8,49	34,01	8,08	34,33	7,14

Bei differenzierter Betrachtung der im Durchschnitt erzielten maximalen Leistungen für jeden einzelnen WAnT erreicht die Gruppe der sehr gut ausdauertrainierten Probanden in jedem Durchgang eine höhere Leistung (s. Abb. 59). Die dabei entstandenen Mittelwertunterschiede von  $10,93 \pm 2,08$  vs.  $9,27 \pm 1,60$  W/kg,  $p = 0,02$ ;  $10,46 \pm 2,08$  vs.  $8,55 \pm 1,57$  W/kg,  $p = 0,0096$ ;  $10,28 \pm 1,77$  vs.  $8,73 \pm 1,52$  W/kg,  $p = 0,017$  sowie  $10,17 \pm 1,53$  vs.  $8,67 \pm 1,33$  W/kg,  $p = 0,008$  sind, wie bereits bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenzeit, ausnahmslos als signifikant anzusehen. Die sehr gut Ausdauertrainierten weisen über den Testverlauf einen Abfall der maximalen Wattwerte auf, währenddessen die gut ausdauertrainierten Sportler im dritten WAnT noch einen kleinen Leistungsanstieg erzielen können.

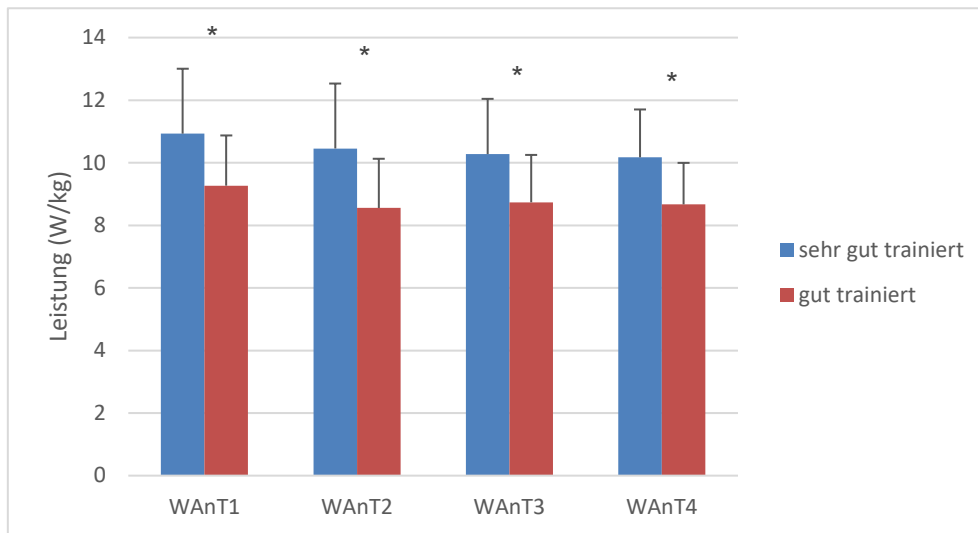


Abb. 59. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Über den kompletten Testverlauf können die sehr gut ausdauertrainierten Probanden die maximale Leistung aus dem vorangegangenen WAnT sehr gut reproduzieren, währenddessen die gut Ausdauertrainierten größere Schwankungen aufweisen (s. Abb. 60). Die Mittelwertunterschiede in der prozentualen Erholung der Muskulatur von  $96,22 \pm 10,66$  vs.  $92,45 \pm 10,05$  % ( $p = 0,33$ );  $99,08 \pm 9,05$  vs.  $102,64 \pm 8,27$  % ( $p = 0,27$ ) sowie  $99,75 \pm 10,47$  vs.  $100,08 \pm 9,40$  % ( $p = 0,93$ ) zwischen beiden Gruppen sind allerdings nicht signifikant.

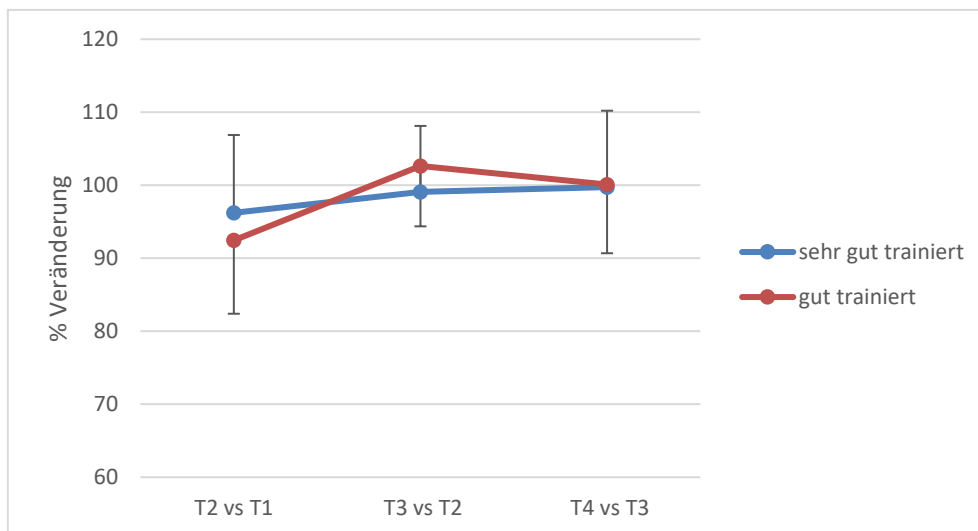


Abb. 60. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Im Folgenden werden die durchschnittlichen Leistungen für jeden WAnT bei einer Pausenzeit von zehn Minuten grafisch gegenübergestellt (s. Abb. 61). Auch dabei kommt es zu großen Differenzen in den durchschnittlich erreichten Wattwerten zwischen beiden Gruppen. Die Mittelwertunterschiede von  $8,07 \pm 1,51$  vs.  $5,72 \pm 1,02$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $7,94 \pm 1,34$  vs.  $5,70 \pm 0,96$  W/kg ( $p < 0,001$ );  $7,93 \pm 1,30$  vs.  $5,71 \pm 0,96$  W/kg ( $p < 0,001$ ) sowie  $7,94 \pm 1,26$  vs.  $5,67 \pm 0,98$  W/kg ( $p < 0,001$ ) sind in allen vier Durchgängen hochsignifikant. Beide Stichproben erzielen in dem ersten WAnT den höchsten durchschnittlichen Wattwert und sind dann in den darauffolgenden Durchgängen in der Lage ihre Leistungen auf sehr hohem Niveau zu stabilisieren. Ein Abfall der Leistungen über den Testverlauf ist bei beiden Probandengruppen kaum festzustellen.

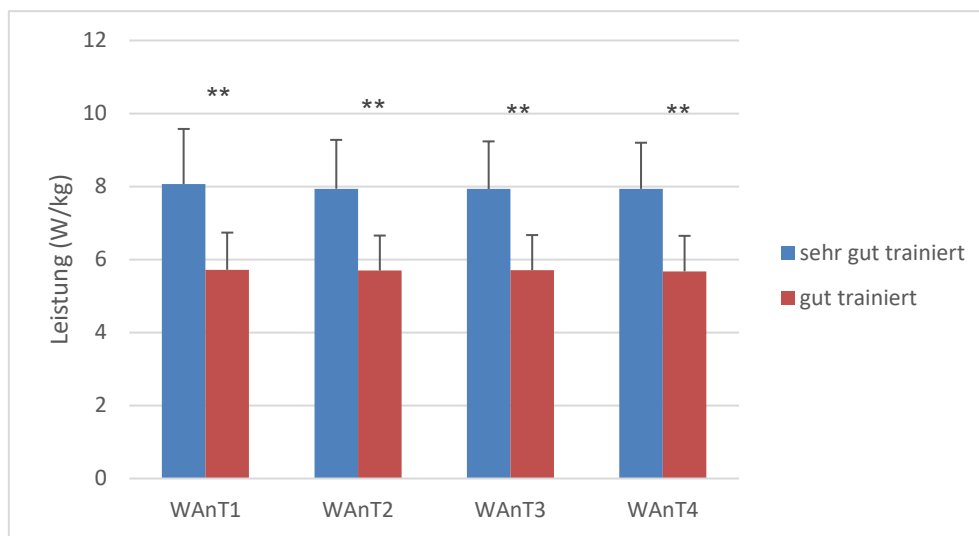


Abb. 61. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Die geringe Streuung in den Ergebnissen zeigt sich auch bei der Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Leistungen auf den vorangegangenen WAnT (s. Abb. 62). Beide Stichproben weisen eine hohe und nahezu identische Erholung der Muskulatur über den Testverlauf auf. Die Mittelwertunterschiede in der prozentualen Veränderung zum vorhergehenden 30-sekündigen All-Out-Test von  $98,79 \pm 4,82$  vs.  $99,91 \pm 5,85$  % ( $p = 0,56$ );  $100,08 \pm 3,76$  vs.  $100,41 \pm 6,14$  % ( $p = 0,85$ ) sowie  $100,16 \pm 2,70$  vs.  $99,38 \pm 3,22$  % ( $p = 0,47$ ) sind dabei als nicht signifikant einzuschätzen.

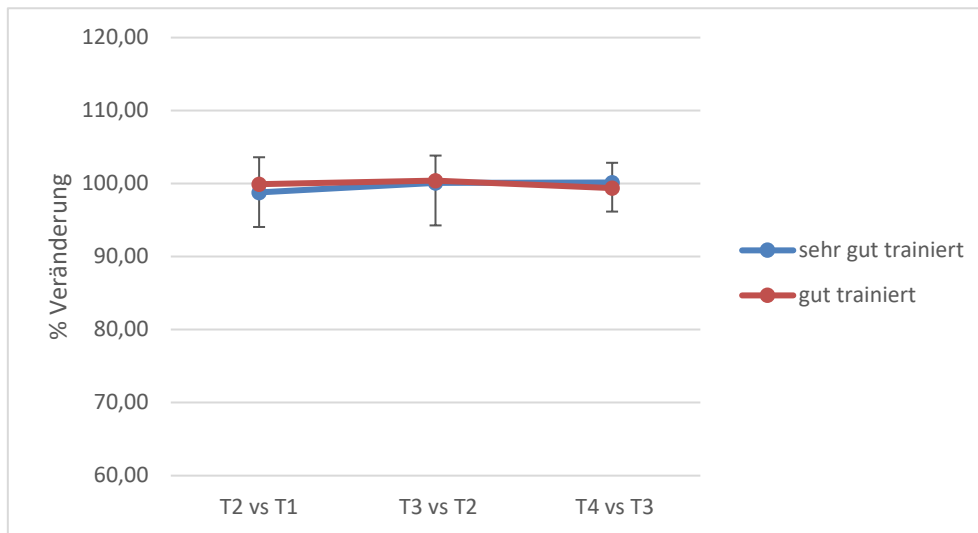


Abb. 62. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

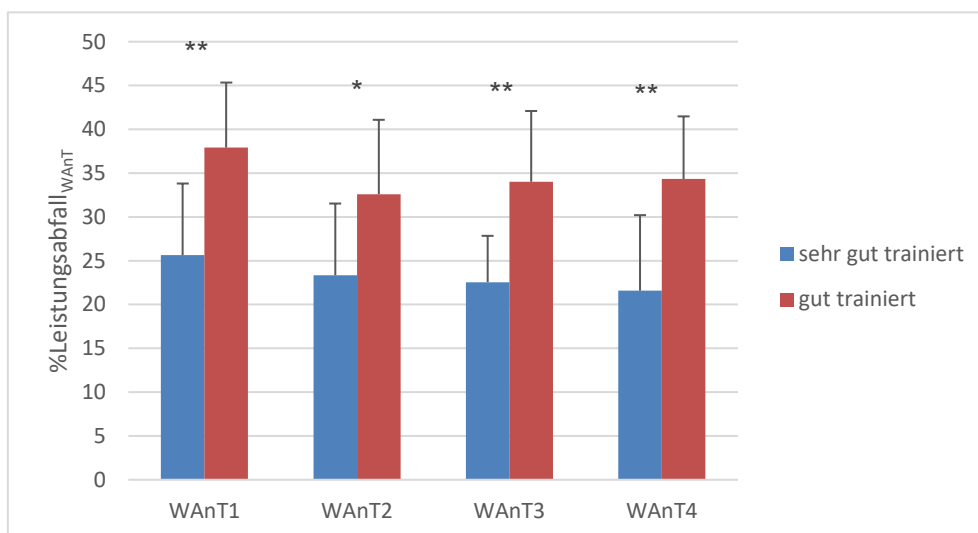


Abb. 63. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Hinsichtlich des prozentualen Leistungsabfalls innerhalb der jeweiligen 30 Sekunden Ausbelastung ergibt sich ebenfalls ein großer Unterschied zwischen beiden Gruppen (s. Abb. 63). Die sehr gut ausdauertrainierten Probanden erreichen in allen vier Durchgängen einen geringen Leistungsabfall. Die Mittelwertunterschiede zwischen beiden Stichproben von  $25,64 \pm 8,17$  vs.  $37,91 \pm 7,42$  % ( $p < 0,001$ );  $23,34 \pm 8,19$  vs.  $32,60 \pm 8,49$  % ( $p = 0,005$ );  $22,55 \pm 5,29$  vs.  $34,01 \pm 8,08$  % ( $p < 0,001$ ) sowie  $21,58 \pm 8,62$  vs.  $34,33 \pm 7,14$  % ( $p < 0,001$ ) sind signifikant bzw. hochsignifikant.

Beide Gruppen verzeichnen im ersten WAnT den höchsten Leistungsabfall über die 30 Sekunden. Während bei den sehr gut Ausdauertrainierten der Leistungsabfall von Durchgang zu Durchgang geringer wird, nimmt er bei den gut ausdauertrainierten Probanden im dritten und vierten WAnT nochmals leicht zu.

Bei einer 10-minütigen Pausenzeit zwischen den jeweiligen WAnTs besteht ein großer negativer Zusammenhang zwischen dem prozentualen Leistungsabfall und der Ausdauerleistungsfähigkeit, bezogen auf das Perzentil der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $r = -0,63$ ) (s. Abb. 64).

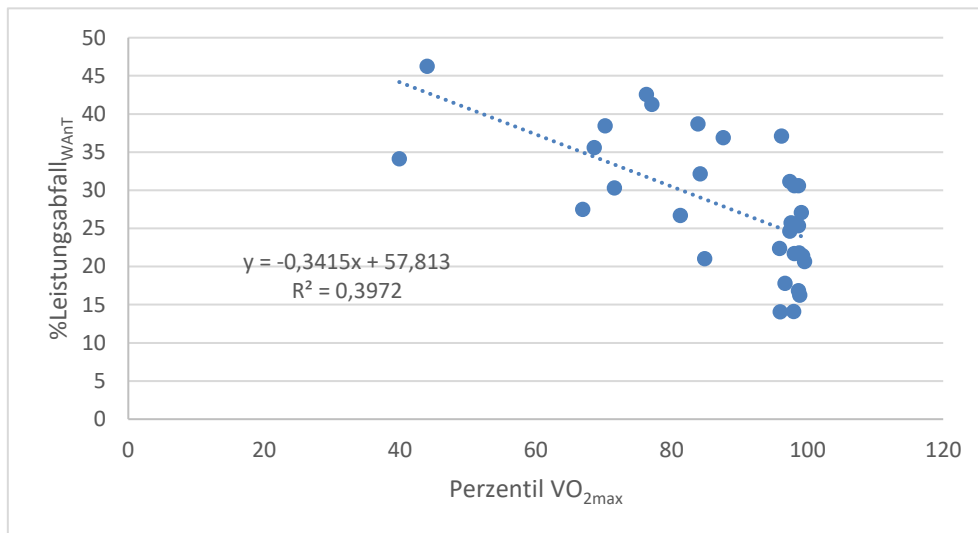


Abb. 64. Korrelation der Ausdauerleistungsfähigkeit (Perzentil VO<sub>2max</sub>) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern

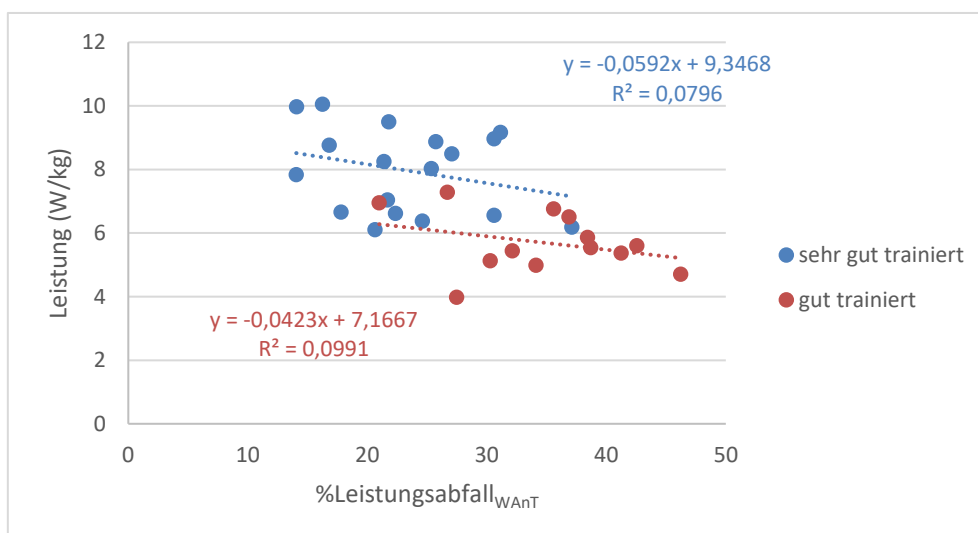


Abb. 65. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen sehr gut und gut ausdauertrainierten Sportlern

Bezogen auf die durchschnittliche Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten lässt sich bei den sehr gut ausdauertrainierten Probanden ein geringer negativer Zusammenhang feststellen ( $r = -0,28$ ). Bei den gut ausdauertrainierten Sportlern besteht dagegen eine mittlere negative Korrelation zwischen beiden Variablen ( $r = -0,31$ ) (s. Abb. 65).

### 5.2.2 Pausenlänge

Inwiefern die Länge der Pausenzeit einen Einfluss auf die maximale, durchschnittliche Leistung sowie auf den prozentualen Leistungsabfall innerhalb des jeweiligen WAnTs und über den gesamten Verlauf des HIIT-Programms bei sehr gut und gut Ausdauertrainierten hat, wird im Folgenden grafisch gegenübergestellt (s. Abb. 66-69). Die maximale Leistung, die durchschnittlichen Leistung und der prozentuale Leistungsabfall während des WAnT weisen in den Mittelwertunterschieden zwischen beiden Gruppen Hochsignifikanzen auf. Bei detaillierter Betrachtung der maximalen Leistung wird ersichtlich, dass die sehr gut ausdauertrainierten Probanden sowohl bei einer Minute ( $9,03 \pm 1,90$  vs.  $7,61 \pm 1,62$  W/kg,  $p < 0,001$ ), drei Minuten ( $10,16 \pm 1,80$  vs.  $8,24 \pm 1,60$  W/kg,  $p < 0,001$ ) als auch bei zehn Minuten Pausenlänge ( $10,46 \pm 1,86$  vs.  $8,81 \pm 1,49$  W/kg,  $p < 0,001$ ) hochsignifikant höhere Wattwerte erreicht haben (s. Abb. 66). Beide Gruppen erzielen mit zunehmender Pausenzeit auch gleichzeitig im Mittel höhere maximale Leistungen. Währenddessen bei 1-minütiger Regenerationsphase die kleinste Differenz zwischen sehr gut und gut Ausdauertrainierten auftritt, weist das Testprotokoll mit 3-minütiger Pause den größten Unterschied in der maximalen Leistung zwischen beiden Stichproben auf.

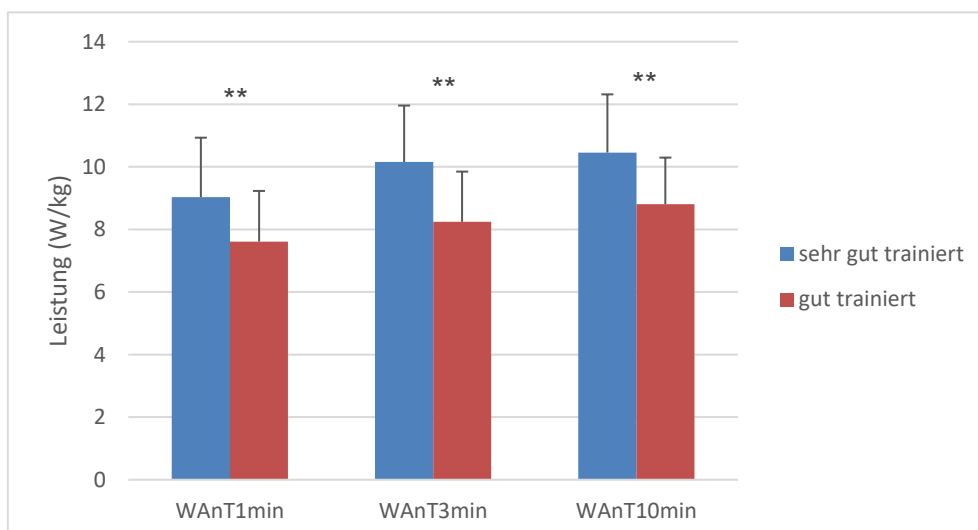


Abb. 66. Mittelwerte mit Standardabweichung der maximalen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten

Zwischen der Pausenlänge und der Ausdauerleistungsfähigkeit gibt es keine statistisch signifikante Interaktion, Greenhouse–Geisser  $F(1,66; 48,25) = 1,03$ ,  $p = 0,35$ , partielles  $\eta^2 = 0,034$ . Die Auswertung mittels einer ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden  $F(2; 60) = 32,17$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,52$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) in der maximalen Leistung zwischen den Testprotokollen eine vs. drei Minuten sowie eine vs. zehn Minuten Pausenlänge. Abschließend lässt sich feststellen, dass ein signifikanter Haupteffekt der Ausdauerleistungsfähigkeit auftritt, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1,29) = 12,55$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,30$ .

Auch bei der durchschnittlich erreichten Leistung innerhalb des jeweiligen WAnTs kommt es zu großen Differenzen zwischen den beiden Gruppen. Der Mittelwertunterschied ist sowohl bei einer Minute ( $6,95 \pm 1,27$  vs.  $4,94 \pm 0,90$  W/kg,  $p < 0,001$ ), drei Minuten ( $7,49 \pm 1,25$  vs.  $5,29 \pm 0,93$  W/kg,  $p < 0,001$ ) als auch zehn Minuten Pausenzeit ( $7,97 \pm 1,33$  vs.  $5,70 \pm 0,95$  W/kg,  $p < 0,001$ ) als hochsignifikant zu bezeichnen (s. Abb. 67). Sowohl die sehr gut Ausdauertrainierten als auch die gut ausdauertrainierten Sportler verzeichnen einen Anstieg der durchschnittlichen Leistung mit zunehmender Regenerationslänge. Anders als bei der maximalen Leistung wird die Differenz zwischen beiden Gruppen in der durchschnittlichen Tretleistung mit zunehmender Pausenlänge größer.

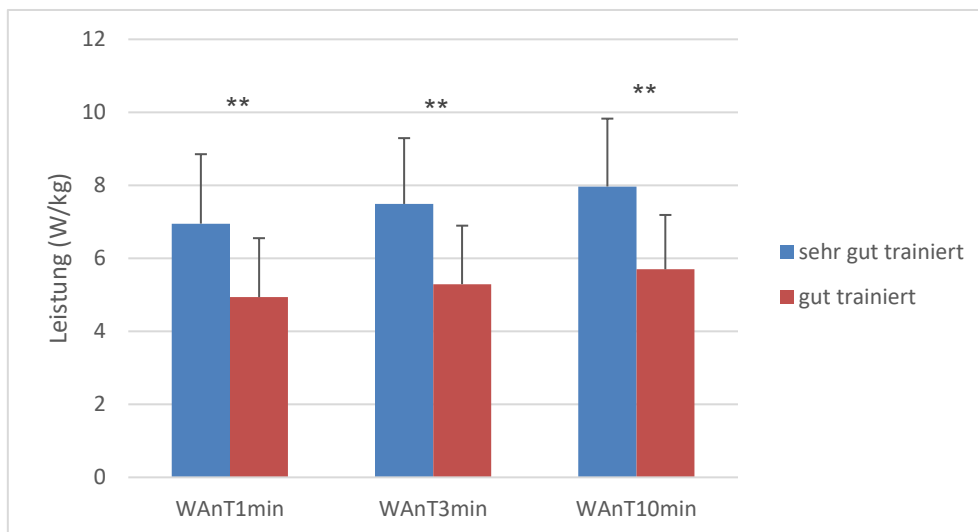


Abb. 67. Mittelwerte mit Standardabweichung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten

Allerdings gibt es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und der Ausdauerleistungsfähigkeit, Greenhouse–Geisser  $F(1,58; 45,83) = 2,11$ ,  $p = 0,14$ , partielles  $\eta^2 = 0,068$ . Die Auswertung mittels der ANOVA mit

Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden, Greenhouse–Geisser  $F(1,57; 47,2) = 101,05, p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,77$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) in der durchschnittlichen Leistung zwischen allen drei Testprotokollen. Abschließend lässt sich feststellen, dass ein signifikanter Haupteffekt der Ausdauerleistungsfähigkeit auftritt, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 29) = 33,15, p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,53$ .

Die Mittelwertunterschiede des prozentualen Leistungsabfalls innerhalb des jeweiligen WAnTs, bezogen auf die unterschiedlichen Pausenlängen, weisen ebenfalls große Differenzen zwischen sehr gut ausdauertrainierten Probanden und gut ausdauertrainierten Sportlern auf. Die Unterschiede sind sowohl bei einer Minute ( $22,30 \pm 7,35$  vs.  $34,46 \pm 7,18$  %,  $p < 0,001$ ), bei drei Minuten ( $25,40 \pm 9,80$  vs.  $35,04 \pm 8,78$  %,  $p < 0,001$ ) als auch bei zehn Minuten aktiver Regenerationszeit ( $23,28 \pm 7,67$  vs.  $34,71 \pm 7,82$  %,  $p < 0,001$ ) hochsignifikant (s. Abb. 68). Beide Gruppen haben bei 3-minütiger Pausenlänge im Mittel den höchsten Leistungsabfall während des WAnTs zu verzeichnen, wohingegen bei 1-minütiger Regenerationsphase der geringste Abfall der Leistung eintritt. Die Differenz des %Leistungsabfall<sub>WAnT</sub> zwischen sehr gut ausdauertrainierten Probanden und gut Ausdauertrainierten ist bei einer Minute Pausenlänge am größten, gefolgt von zehn Minuten Regenerationszeit und drei Minuten Pausenzeit.

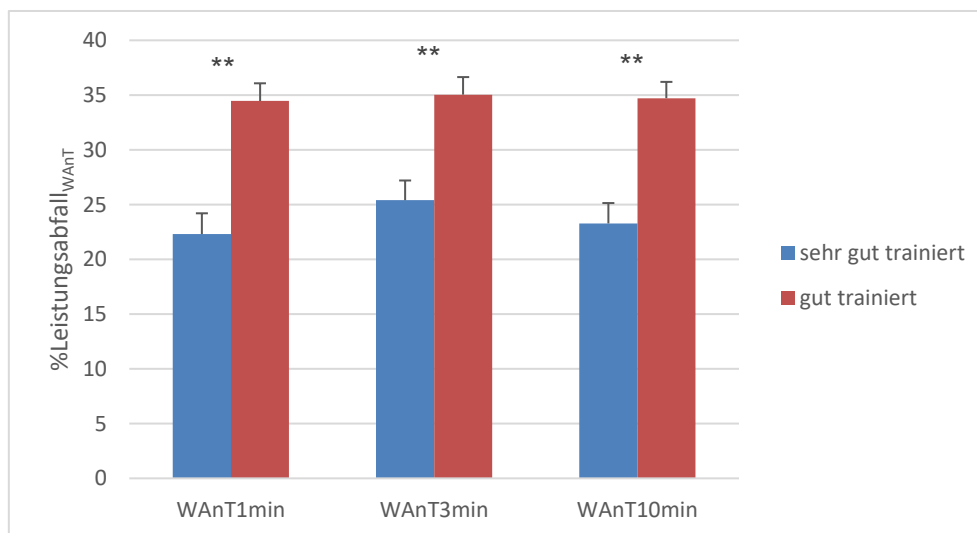


Abb. 68. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls aller vier WAnTs zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten

Es gibt keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und der Ausdauerleistungsfähigkeit  $F(2; 58) = 0,83, p = 0,44$ , partielles  $\eta^2 = 0,028$ .



Die Auswertung mittels ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch keine Signifikanz  $F(2; 60) = 2,21, p = 0,12$ , partielles  $\eta^2 = 0,069$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der dem  $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{WANt}}$  zwischen den drei Testprotokollen. Letztendlich lässt sich noch ein signifikanter Haupteffekt der Ausdauerleistungsfähigkeit feststellen, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 29) = 23,05, p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,44$ .

Die Betrachtung des prozentualen Leistungsabfalls zwischen dem ersten WANt und dem vierten WANt für die unterschiedlichen Testprotokolle lässt erkennen, dass sehr gut ausdauertrainierten Sportler sowohl bei einer Minute ( $19,27 \pm 11,44$  vs.  $22,27 \pm 10,85$  %,  $p = 0,47$ ) als auch drei Minuten Pausenzeit ( $12,17 \pm 7,80$  vs.  $14,19 \pm 11,55$  %,  $p = 0,57$ ) einen geringeren Leistungsabfall aufweisen als die gut ausdauertrainierten Probanden (s. Abb. 69). Die Mittelwertunterschiede sind bei beiden Testdesigns allerdings nicht signifikant. Bei einer Regenerationszeit von zehn Minuten ist der prozentuale Leistungsabfall über den Testverlauf bei den sehr gut Ausdauertrainierten leicht höher als bei den gut ausdauertrainierten Personen ( $1,10 \pm 4,16$  vs.  $0,41 \pm 7,57$  %,  $p = 0,74$ ). Auch diese Differenz weist keine statistische Signifikanz auf. Insgesamt zeigt sich anhand der Ergebnisse, dass mit zunehmender Pausenlänge der Leistungsabfall innerhalb des Testverlaufes als auch der Unterschied zwischen beiden Probandengruppen abnimmt.

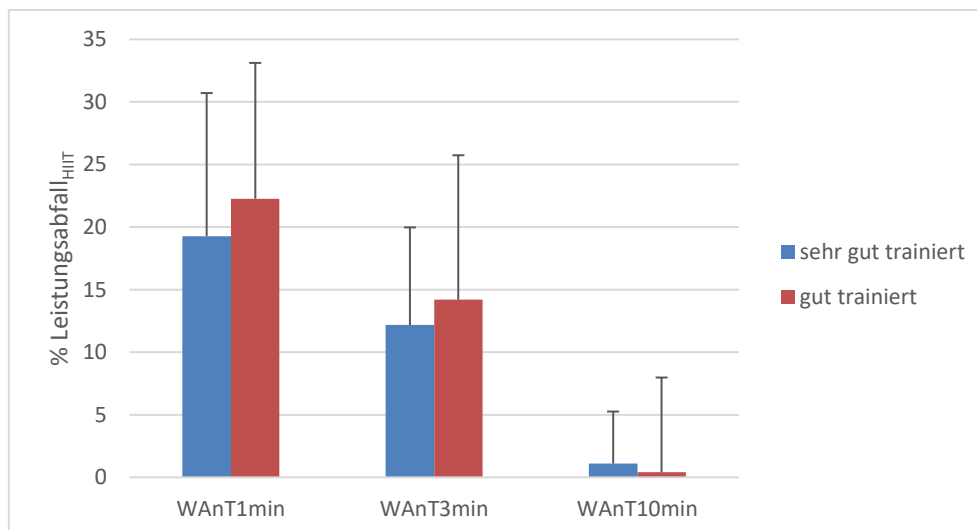


Abb. 69. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls vom ersten zum vierten WANt zwischen sehr gut Ausdauertrainierten und gut Ausdauertrainierten bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten

Weiterhin gibt es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und der Ausdauerleistungsfähigkeit, Greenhouse–Geisser  $F(1,47; 42,49) = 0,96, p = 0,37$ , partielles  $\eta^2 = 0,032$ . Eine Auswertung

mittels ANOVA nach Greenhouse-Geisser-Korrektur zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden  $F(1,45; 43,48) = 105,91$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,78$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-Hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,001$ ) zwischen allen drei Testprotokollen (s. Tab. 20).

Tab. 20. Ergebnisse des Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für den Innersubjektfaktor %Leistungsabfall

(I)Pausenlänge	(J)Pausenlänge	Mittlere Differenz (I-J)	Standard Fehler	Sig.	95% Konfidenzintervall für die Differenz	
					Untergrenze	Obergrenze
WAnT1min	WAnT3min	7,508	,888	,000	5,257	9,760
	WAnT10min	19,715	1,660	,000	15,506	23,924
WAnT3min	WAnT10min	12,207	1,437	,000	8,563	15,851

Des Weiteren lässt sich kein signifikanter Haupteffekt der Ausdauerleistungsfähigkeit feststellen, was für keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 29) = 0,25$ ,  $p = 0,62$ , partielles  $\eta^2 = 0,008$ .

### 5.2.3 Belastungs- und Erholungsherzfrequenzverhalten

Im folgenden Unterkapitel werden die durchschnittlichen Belastungs-, Pausen- und Erholungsherzfrequenzen für die unterschiedlich langen aktiven Regenerationszeiten für die Gruppen der sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Probanden grafisch gegenübergestellt sowie die Mittelwertunterschiede statistisch überprüft. Wie bereits bei der geschlechtsspezifischen Ergebnisdarstellung werden die mittleren Ruhewerte, die Belastungsherzfrequenzen am Ende des jeweiligen WAnTs, die Herzfrequenzen während der aktiven Pausenzeit zwischen den 30-sekündigen Belastungen sowie die Werte innerhalb der 15-minütigen Erholungsphase betrachtet. Bei dem Testprotokoll mit drei bzw. zehn Minuten aktiver Pausenzeit wird sowohl die durchschnittliche Erholungsherzfrequenz für die erste als auch die dritte bzw. zehnte Minute dargestellt. Des Weiteren wird die prozentuale Erholung des Herz-Kreislauf-Systems nach der Intervallbelastung für beide Stichproben gegenübergestellt und analysiert. Unabhängig von der aktiven Regenerationszeit zeigt sich, dass die sehr gut ausdauertrainierten Probanden zu nahezu allen Messzeitpunkten im Mittel eine höhere Belastungs- sowie eine geringere Pausen- und Erholungsherzfrequenz aufweisen, als die gut ausdauertrainierten Sportler. Auch in der prozentualen Erholung des Herz-Kreislauf-Systems treten teils erhebliche Unterschiede zwischen beiden Stichproben auf. Bei differenzierter Betrachtung des durchschnittlichen Herzfrequenzverlaufes bei einer Pausenzeit von einer Minute weisen die

Mittelwertunterschiede zwischen beiden Gruppen allerdings keine Signifikanzen auf (s. Abb. 70).

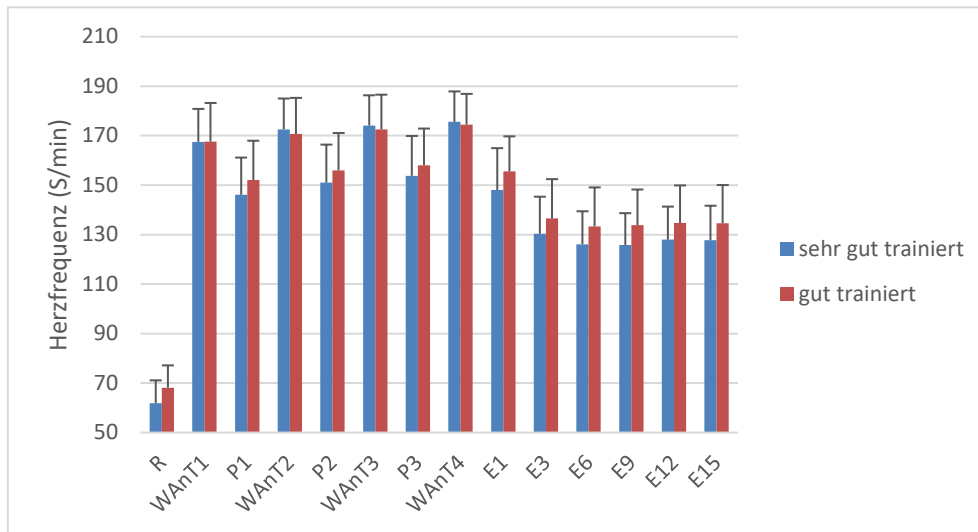


Abb. 70. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von einer Minute (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

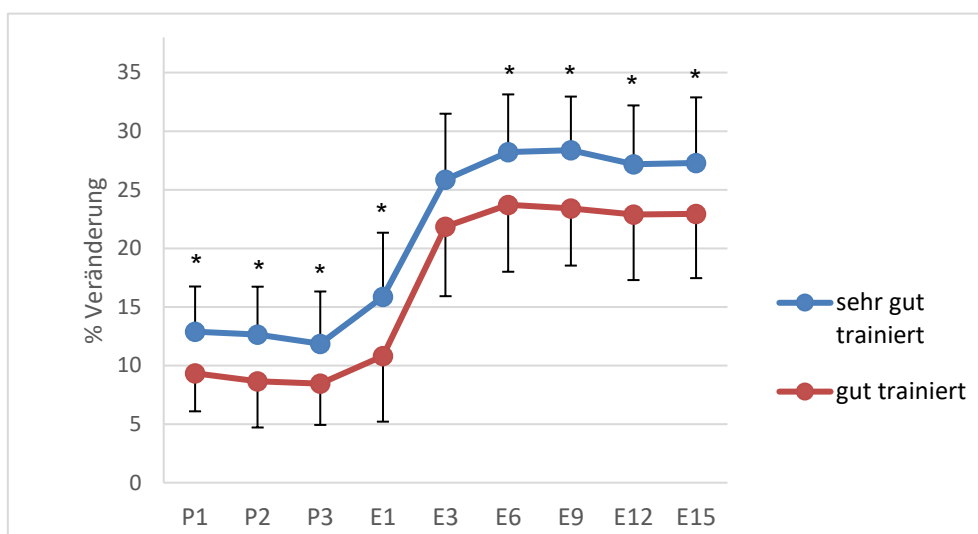


Abb. 71. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von einer Minute nach den WAnTs (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Anders stellt es sich bei den Ergebnissen der prozentualen Erholung des Herz-Kreislauf-Systems dar. Die sehr gut ausdauertrainierten Probanden erzielen zu allen Messzeitpunkten einen teils deutlich höheren Abfall der Herzfrequenz (s. Abb. 71). Die Mittelwertunterschiede der prozentualen Veränderungen der Herzfrequenz

weisen dabei sowohl zu den Messzeitpunkten der aktiven Pausenzeiten P1 ( $12,88 \pm 3,86$  vs.  $9,35 \pm 3,26$  %;  $p = 0,012$ ), P2 ( $12,64 \pm 4,08$  vs.  $8,66 \pm 3,95$  %;  $p = 0,011$ ), P3 ( $11,86 \pm 4,46$  vs.  $8,45 \pm 3,53$  %;  $p = 0,03$ ) als auch zu den Messwerten während der 15-minütigen Erholungsphase E1 ( $15,86 \pm 5,47$  vs.  $10,81 \pm 5,61$  %;  $p = 0,018$ ), E6 ( $28,22 \pm 4,91$  vs.  $23,72 \pm 5,72$  %;  $p = 0,026$ ), E9 ( $28,37 \pm 4,58$  vs.  $23,42 \pm 4,89$  %;  $p = 0,007$ ), E12 ( $27,17 \pm 5,03$  vs.  $22,88 \pm 5,59$  %;  $p = 0,03$ ) und E15 ( $27,29 \pm 5,59$  vs.  $22,95 \pm 5,49$  %;  $p = 0,04$ ) Signifikanzen auf. Der durchschnittliche Erholungswert nach drei Minuten ist hingegen nicht signifikant ( $p = 0,06$ ). Weiterhin zeigt sich, dass vor allem bei den gut ausdauertrainierten Sportlern die durchschnittliche Herzfrequenz gegen Ende der Erholungsphase noch einmal leicht ansteigt. Auch bei 3-minütiger Pausenzeit zwischen den einzelnen WAnTs zeigt sich, dass die sehr gut ausdauertrainierten Sportler im Mittel sowohl eine höhere Belastungsherzfrequenz am Ende des 30-sekündigen All-Out-Tests, als auch eine geringere Pausenherzfrequenz in der 3-minütigen Regenerationsphase sowie Erholungsherzfrequenz in dem 15-minütigen Ausfahren aufweisen (s. Abb. 72). Die Mittelwertunterschiede sind allerdings, wie bereits schon bei 1-minütiger Pausenzeit nicht signifikant.

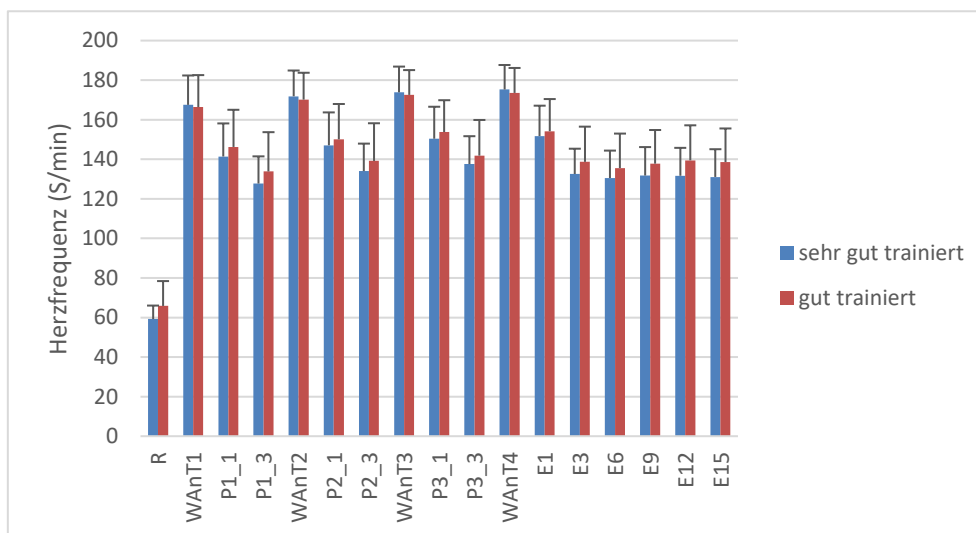


Abb. 72. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von drei Minuten (P1\_1, P1\_3, P2\_1, P2\_3, P3\_1, P3\_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Die Erholung des Herz-Kreislaufsystems während der Pausenzeiten und innerhalb der 15-minütigen Ausfahrphase zeigen deutliche Differenzen zwischen beiden Gruppen (s. Abb. 73). Die sehr gut Ausdauertrainierten erreichen zu allen Messzeitpunkten einen höheren prozentualen Abfall der Herzfrequenz. Allerdings gibt es bei den Mittelwertunterschieden des prozentualen Abfalls der Pausenherzfrequenz, im Unterschied zu der 1-minütigen Regenerationszeit, sowohl in der ersten ( $15,69 \pm 5,00$  vs.  $12,22 \pm 5,57$  %,  $p = 0,08$ ;  $14,59 \pm 4,84$  vs.  $11,94 \pm$

5,71 %,  $p = 0,17$  und  $13,63 \pm 4,65$  vs.  $10,95 \pm 5,42$ ,  $p = 0,15$ ) als auch dritten Minute ( $23,76 \pm 4,28$  vs.  $19,68 \pm 7,52$  %,  $p = 0,065$ ;  $22,11 \pm 3,89$  vs.  $18,40 \pm 7,04$  %,  $p = 0,07$  sowie  $20,96 \pm 4,12$  vs.  $17,87 \pm 7,46$  %,  $p = 0,15$ ) nach dem WAnT keine Signifikanzen. Bei beiden Gruppen sinkt die prozentuale Erholung des Herz-Kreislauf-Systems über den Testverlauf ab.

Wie bereits bei einer Minute Regenerationszeit kommt es zu großen Unterschieden in der 15-minütigen Erholungsphase. Die Mittelwertunterschiede zu den Messzeitpunkten E3 ( $24,43 \pm 4,04$  vs.  $20,16 \pm 7,43$  %,  $p = 0,048$ ), E12 ( $24,92 \pm 5,44$  vs.  $19,76 \pm 6,89$  %,  $p = 0,027$ ) und E15 ( $25,27 \pm 5,27$  vs.  $20,21 \pm 6,64$  %,  $p = 0,025$ ) sind signifikant. Die Messzeitpunkte E1 ( $13,57 \pm 4,37$  vs.  $11,24 \pm 5,61$  %,  $p = 0,2$ ), E6 ( $25,63 \pm 4,52$  vs.  $22,01 \pm 6,94$  %,  $p = 0,088$ ) und E9 ( $24,92 \pm 4,75$  vs.  $20,69 \pm 6,83$  %,  $p = 0,051$ ) zeigen zwar statistische Tendenzen und Unterschiede allerdings sind diese als nicht signifikant zu bezeichnen. Währenddessen die sehr gut ausdauertrainierten Probanden zwischen der sechsten und fünfzehnten Minute der Nachbelastungsphase die durchschnittliche Herzfrequenz stabilisieren, steigt sie bei der Gruppe der gut ausdauertrainierten Sportler im gleichen Zeitraum erneut leicht an.

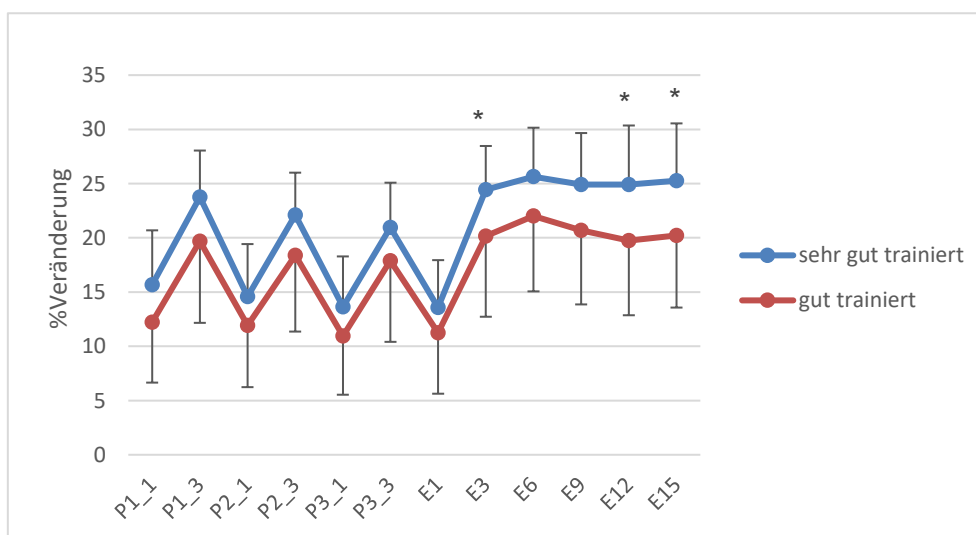


Abb. 73. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von drei Minuten nach den WAnTs (P1\_1, P1\_3, P2\_1, P2\_3, P3\_1, P3\_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Die Betrachtung der durchschnittlichen Herzfrequenzen am Ende der jeweiligen 30-sekündigen Belastung, während der 10-minütigen aktiven Pausenzeit zwischen den WAnTs sowie zu den einzelnen Messzeitpunkten in der 15-minütigen Erholungsphase zeigt ebenfalls, dass die sehr gut Ausdauertrainierten im Mittel eine höhere Belastungs- sowie geringere Pausen- und Erholungsherzfrequenz aufweisen (s. Abb. 74). Die Mittelwertunterschiede sind aber, wie bereits schon bei 1-minütiger und 3-minütiger Regenerationszeit nicht signifikant.

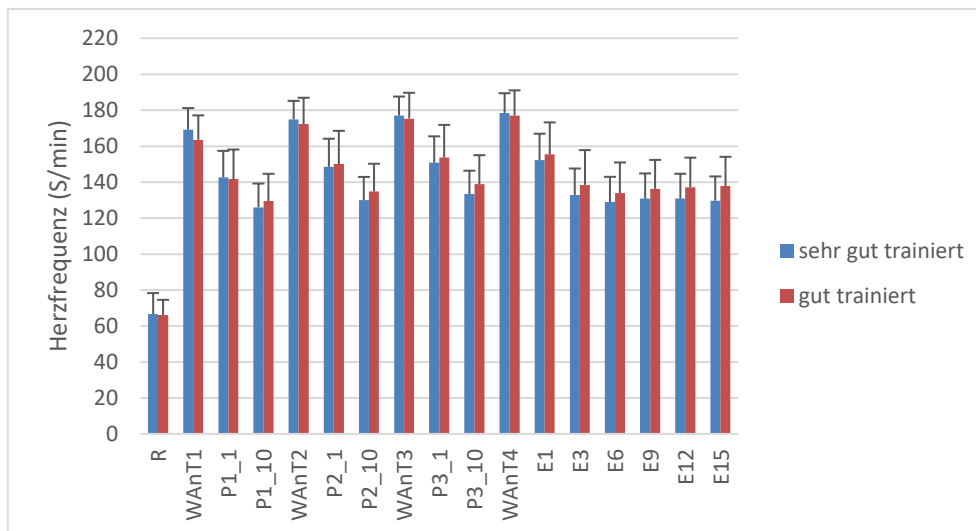


Abb. 74. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von zehn Minuten (P1\_1, P1\_10, P2\_1, P2\_10, P3\_1, P3\_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

Bei näherer Betrachtung der prozentualen Erholung des Herz-Kreislauf-Systems für beide Gruppen wird ersichtlich, dass die sehr gut ausdauertrainierten Probanden auch bei einer Pausenzeit von zehn Minuten zwischen den WAnTs sowohl in den mittleren Veränderungen der Pausenherzfrequenz als auch der Erholungsherzfrequenz höhere Werte erreichen (s. Abb. 75). Wie bereits bei 3-minütiger Pause ist der prozentuale Abfall der Herzfrequenz in der ersten Minute der Regenerationszeit nicht signifikant ( $15,76 \pm 4,67$  vs.  $13,51 \pm 4,42$  %,  $p = 0,19$ ;  $15,25 \pm 5,44$  vs.  $13,14 \pm 5,07$  %,  $p = 0,28$  und  $14,94 \pm 4,86$  vs.  $12,48 \pm 5,18$  %,  $p = 0,19$ ). Allerdings weisen die Werte in der zehnten Minute der jeweiligen Pause signifikante Mittelwertunterschiede auf ( $25,43 \pm 6,51$  vs.  $20,92 \pm 4,45$  %,  $p = 0,04$ ;  $25,76 \pm 5,46$  vs.  $21,88 \pm 4,26$  %,  $p = 0,04$  und  $24,70 \pm 5,28$  vs.  $20,87 \pm 4,49$  %,  $p = 0,04$ ). In der 15-minütigen Erholungsphase treten ebenfalls zu allen Messzeitpunkten Differenzen zwischen beiden Stichproben auf. Allerdings weisen nur die Mittelwertunterschiede der Messpunkte E12 ( $26,75 \pm 5,66$  vs.  $21,91 \pm 4,96$  %,  $p = 0,01$ ) und E15 ( $27,36 \pm 5,62$  vs.  $21,75 \pm 5,29$  %,  $p = 0,004$ ) Signifikanzen auf. Die auftretenden Unterschiede der Erholung der Herzfrequenz zu E1 ( $14,79 \pm 4,98$  vs.  $12,40 \pm 4,89$  %,  $p = 0,19$ ), E3 ( $25,66 \pm 5,64$  vs.  $22,04 \pm 6,38$  %,  $p = 0,11$ ), E6 ( $27,85 \pm 5,33$  vs.  $24,54 \pm 5,17$  %,  $p = 0,1$ ) und E9 ( $26,79 \pm 5,18$  vs.  $23,17 \pm 4,39$  %,  $p = 0,05$ ) sind dahingegen nicht signifikant. Je länger die Regenerationszeit ist, umso größer wird die Differenz der prozentualen Erholung zwischen beiden Stichproben. Weiterhin kann bei den sehr gut ausdauertrainierten Probanden eine Stabilisierung der Herzfrequenz in der Nachbelastungsphase festgestellt werden, wohingegen sie bei der Gruppe der gut Ausdauertrainierten ab der neunten Minute noch einmal leicht ansteigt.

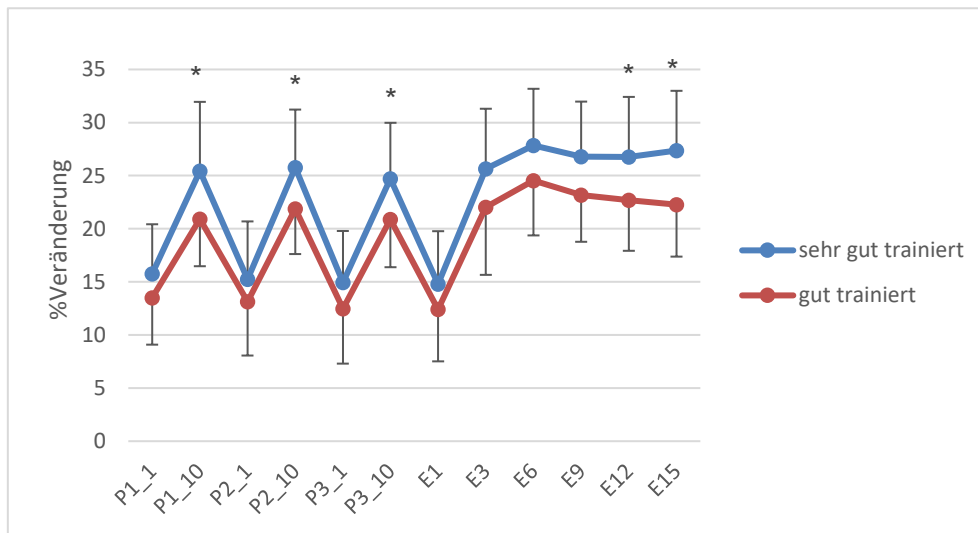


Abb. 75. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von zehn Minuten nach den WANts (P1\_1, P1\_10, P2\_1, P2\_10, P3\_1, P3\_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Sportlern

#### 5.2.4 Laktatverhalten

Im folgenden Unterkapitel werden die durchschnittlichen Laktatkonzentrationen über den kompletten Testverlauf für die unterschiedlichen aktiven Regenerationszeiten von einer, drei und zehn Minuten für die beiden Stichproben der sehr gut ausdauertrainierten und gut ausdauertrainierten Probanden gegenübergestellt und die Mittelwertunterschiede auf Signifikanzen überprüft (s. Abb. 76). Des Weiteren wird die Laktatabbaurate für beide Probandengruppen innerhalb der Nachbelastungsphase hinsichtlich der unterschiedlichen Testprotokolle dargestellt (s. Abb. 77). Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass es zwischen beiden Gruppen, unabhängig von der Länge der Pausenzeit zwischen den einzelnen WANts, zu keinen wesentlichen Mittelwertunterschieden in der durchschnittlichen Laktatkonzentration über den kompletten Testverlauf kommt. Lediglich die Ruhewerte zeigen bei dem Testprotokoll mit einer und drei Minuten Pause signifikante Mittelwertsunterschiede ( $0,91 \pm 0,23$  vs.  $1,13 \pm 0,32$  mmol/l,  $p = 0,04$  und  $0,76 \pm 0,18$  vs.  $0,93 \pm 0,24$  mmol/l,  $p = 0,04$ ). Die mittleren Laktatwerte beider Gruppen verhalten sich in allen drei Testprotokollen nach dem jeweiligen WANt nahezu kongruent. Währenddessen zeigt sich zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten der 15-minütigen Erholungsphase, dass die sehr gut ausdauertrainierten Probanden im Mittel die Laktatkonzentration schneller reduzieren. Die durchschnittlich höchste Laktatkonzentration erreichen die sehr gut ausdauertrainierten Probanden in allen drei Testdesigns drei Minuten nach dem letzten WANt (E3). Die dabei ermittelten maximalen Laktatkonzentrationen weisen bei dem Testdesign mit drei Minuten aktiver Regenerationszeit die höchsten durchschnittlichen Laktatkonzentrationen auf ( $14,71 \pm 4,56$  mmol/l), gefolgt von dem

Testdesign mit einer Minute aktiver Pause ( $14,39 \pm 3,23$  mmol/l) sowie dem Testprotokoll mit 10-minütiger Regenerationsphase zwischen den einzelnen WAnTs ( $10,84 \pm 3,40$  mmol/l). Im Unterschied dazu weisen die gut ausdauertrainierten Sportler bei einer Pausenzeit von drei Minuten ihre durchschnittlich höchste Laktatkonzentration direkt nach dem vierten WAnT ( $14,97 \pm 3,33$  mmol/l) auf. Bei den Testprotokollen mit einer und zehn Minuten Regenerationszeit ist der durchschnittlich höchste Laktatwert ( $14,48 \pm 2,77$  und  $11,24 \pm 2,62$  mmol/l) drei Minuten nach dem letzten WAnT (E3) ermittelt worden. Beide Gruppen erreichen bei dem Testprotokoll mit 3-minütiger Pause die durchschnittlich höchsten Laktatkonzentrationen, gefolgt von dem Testdesign mit einer Minute aktiver Regeneration zwischen den WAnTs und dem Testablauf mit 10-minütiger Pausengestaltung. Die differenzierte Betrachtung der mittleren Laktatkonzentrationen bei einer aktiven Pausenzeit von einer Minute zeigt, dass es nahezu keine Differenz bei der Laktatbildung innerhalb der Belastungsphase zwischen sehr gut ausdauertrainierten Probanden und gut Ausdauertrainierten gibt. Allerdings zeigt sich ein schnellerer Abtransport des Laktats während der 15-minütigen Ausfahrphase. Die Mittelwertunterschiede bei der Bestimmung der Laktatkonzentration nach dem jeweiligen WAnT ( $4,03 \pm 1,35$  vs.  $3,97 \pm 1,67$  mmol/l,  $p = 0,91$ ;  $9,09 \pm 2,21$  vs.  $8,75 \pm 2,83$  mmol/l,  $p = 0,71$ ;  $11,99 \pm 2,49$  vs.  $11,73 \pm 3,36$  mmol/l,  $p = 0,67$  und  $14,05 \pm 2,96$  vs.  $14,17 \pm 3,05$  mmol/l,  $p = 0,91$ ) sowie zu den Messzeitpunkten E3 ( $14,39 \pm 3,23$  vs.  $14,48 \pm 2,77$  mmol/l,  $p = 0,94$ ), E6 ( $12,63 \pm 3,14$  vs.  $13,36 \pm 3,04$  mmol/l,  $p = 0,52$ ), E9 ( $10,82 \pm 3,38$  vs.  $11,56 \pm 3,22$  mmol/l,  $p = 0,54$ ), E12 ( $9,11 \pm 3,13$  vs.  $9,38 \pm 3,06$  mmol/l,  $p = 0,81$ ) und E15 ( $6,68 \pm 2,84$  vs.  $7,49 \pm 2,87$  mmol/l,  $p = 0,44$ ) der Erholungsphase sind nicht signifikant (s. Abb. 76 A). Bei dem Testprotokoll mit 3-minütiger Pausenzeit weisen ebenfalls beide Gruppen eine nahezu identische Laktatbildung während der Belastungsphase auf ( $4,55 \pm 1,57$  vs.  $4,49 \pm 1,69$  mmol/l,  $p = 0,91$ ;  $10,07 \pm 2,58$  vs.  $10,16 \pm 2,86$  mmol/l,  $p = 0,93$ ;  $13,10 \pm 3,79$  vs.  $13,26 \pm 3,69$  mmol/l,  $p = 0,91$  und  $14,58 \pm 4,07$  vs.  $14,97 \pm 4,33$  mmol/l,  $p = 0,80$ ). Auch bei diesem Testdesign vollzieht sich der Abtransport des Laktats bei den sehr gut ausdauertrainierten Sportlern schneller. Die Mittelwertunterschiede zu den Messzeitpunkten E3 ( $14,71 \pm 4,56$  vs.  $14,74 \pm 3,09$  mmol/l,  $p = 0,98$ ), E6 ( $12,89 \pm 4,48$  vs.  $13,24 \pm 3,30$  mmol/l,  $p = 0,81$ ), E9 ( $10,56 \pm 4,33$  vs.  $11,57 \pm 3,07$  mmol/l,  $p = 0,47$ ), E12 ( $8,47 \pm 3,73$  vs.  $9,66 \pm 3,07$  mmol/l,  $p = 0,35$ ) und E15 ( $6,93 \pm 3,58$  vs.  $8,11 \pm 3,22$  mmol/l,  $p = 0,35$ ) sind ebenfalls nicht signifikant (s. Abb. 76 B). Im Unterschied zu den Testprotokollen mit 1-minütiger und 3-minütiger Regeneration zwischen dem jeweiligen WAnT, sind bei dem Testdesign mit zehn Minuten Pausenzeit auch die Laktatkonzentrationen zusätzlich in der Pause bestimmt worden. Allerdings weisen die Mittelwertunterschiede zu den Messzeitpunkten P1 ( $6,65 \pm 2,56$  vs.  $6,63 \pm 2,38$  mmol/l,  $p = 0,98$ ), P2 ( $7,19 \pm 3,09$  vs.  $7,49 \pm 2,71$  mmol/l,  $p = 0,78$ ) und P3 ( $8,05 \pm 3,36$  vs.  $8,42 \pm 2,88$  mmol/l,  $p = 0,49$ ) keine Signifikanzen zwischen beiden Gruppen auf. Des Weiteren ergeben sich auch keine signifikanten Mittelwertunterschiede der Laktatkonzentrationen bei dem jeweiligen WAnT ( $4,69 \pm 1,61$  vs.  $5,33 \pm 1,83$  mmol/l,  $p = 0,31$ ;  $7,45 \pm 1,92$  vs.  $7,82$



$\pm 2,12$  mmol/l,  $p = 0,62$ ;  $8,52 \pm 2,82$  vs.  $8,73 \pm 2,61$  mmol/l,  $p = 0,84$  und  $9,09 \pm 3,09$  vs.  $9,45 \pm 2,54$  mmol/l,  $p = 0,74$ ) sowie zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten E3 ( $10,84 \pm 3,40$  vs.  $11,24 \pm 2,62$  mmol/l,  $p = 0,73$ ), E6 ( $9,98 \pm 3,61$  vs.  $10,43 \pm 3,00$  mmol/l,  $p = 0,71$ ), E9 ( $8,08 \pm 3,34$  vs.  $8,64 \pm 2,85$  mmol/l,  $p = 0,62$ ), E12 ( $6,39 \pm 3,01$  vs.  $7,07 \pm 2,52$  mmol/l,  $p = 0,52$ ) und E15 ( $5,21 \pm 2,62$  vs.  $5,84 \pm 2,35$  mmol/l,  $p = 0,49$ ) der Ausfahrphase (s. Abb. 76 C). Allerdings ist, wie bereits bei 1-minütiger und 3-minütiger Pause erkennbar, dass die Gruppe der sehr gut ausdauertrainierten Probanden das Laktat in der Nachbelastungsphase etwas schneller abtransportiert.

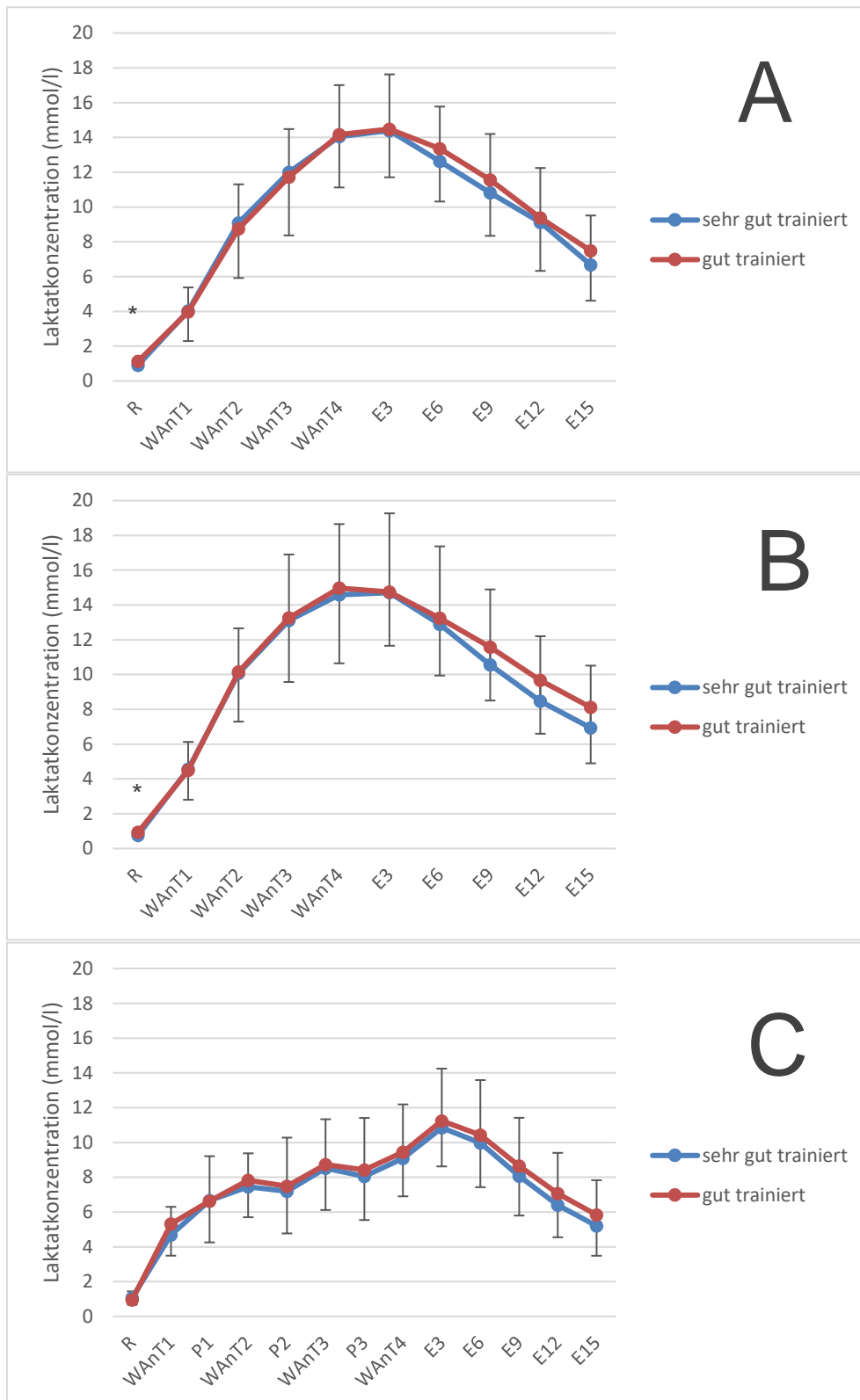


Abb. 76. Durchschnittliche Laktatkonzentration in Ruhe (R), nach den vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen sehr gut trainierten und gut trainierten Sportlern bei unterschiedlichen aktiven Pausenzeiten. A: eine Minute Pausenzeiten, B: drei Minuten Pausenzeiten, C: zehn Minuten Pausenzeiten inklusive Laktatkonzentration am Ende der Pause (P1, P2, P3). \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen sehr gut trainierten und gut trainierten Sportlern

Ähnlich wie bei den Verläufen der Laktatakkumulation über den kompletten Testverlauf sowie für die unterschiedlichen Testprotokolle zeigen sich auch bei dem mittleren prozentualen Laktatabbau innerhalb der 15-minütigen Erholungsphase keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probandengruppen (s. Abb. 77). Im Durchschnitt weisen die Sportler mit sehr gut trainierter Ausdauer bei einer Minute ( $56,29 \pm 14,91$  vs.  $50,75 \pm 12,55$  %,  $p = 0,28$ ), drei Minuten ( $56,80 \pm 13,86$  vs.  $48,60 \pm 9,86$  %,  $p = 0,079$ ) und zehn Minuten Pausenlänge ( $54,88 \pm 14,57$  vs.  $49,69 \pm 10,51$  %,  $p = 0,28$ ) eine höhere Laktatabbaurrate innerhalb der aktiven Erholungsphase auf. Allerdings sind, wie bereits erwähnt, diese Unterschiede nicht als signifikant zu bezeichnen. Unter Einbezug der Pausenzeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen ist die mittlere Laktatabbaurrate sowohl innerhalb der Probandengruppe als auch im Vergleich zum anderen Probandenkollektiv nahezu konstant. Die größte Differenz in der mittleren Laktatabbaurrate tritt zwischen den sehr gut trainierten und gut trainierten Probanden bei dem 3-minütigen Testprotokoll auf.

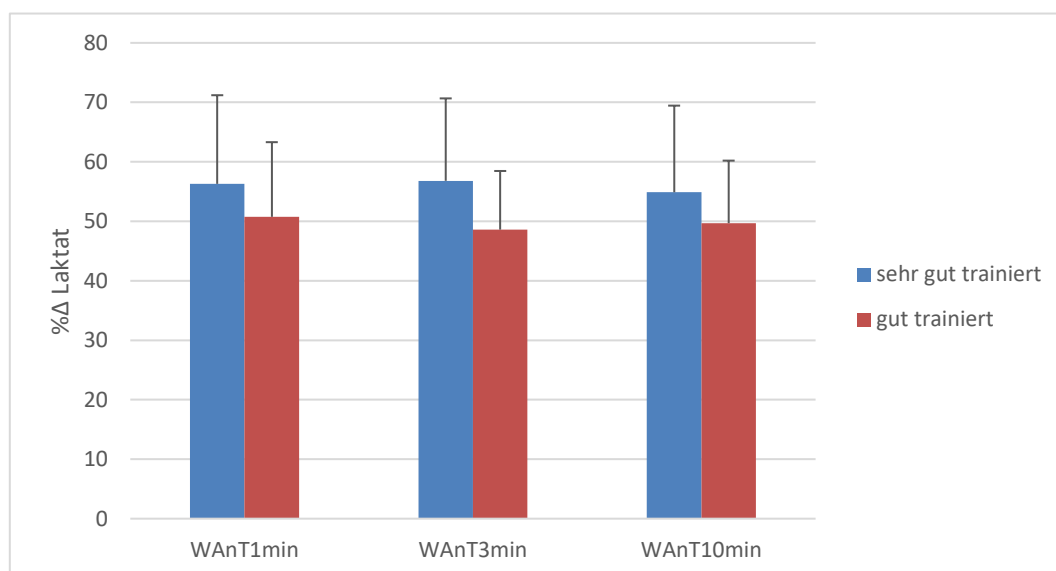


Abb. 77. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Blutlaktatabbaus innerhalb der 15-minütigen aktiven Erholungsphase zwischen sehr gut trainierten und gut trainierten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten

### 5.3 Einfluss des Alters auf abhängige Untersuchungsvariablen

In dem folgenden Kapitel wurde der Einfluss des Alters auf die Belastungs- und Regenerationskinetik nach lokomotorischen Intervallbelastungen näher untersucht. Des Weiteren ist überprüft worden, wie sich die Länge der Pausenzeit auf das Erholungsverhalten von jungen und alten Probanden auswirkt. Für die Auswertung wurden die Datensätze von insgesamt 39 Probanden, mit einer Verteilung von 20 jungen Athleten und 19 Altersklassensportlern einbezogen. Anhand der detaillierten

Charakterisierung des Probandenkollektivs zeigen sich signifikante Mittelwertunterschiede beim Körpergewicht ( $p = 0,01$ ), dem Alter ( $p < 0,001$ ), dem BMI ( $p < 0,001$ ), der Fettmasse ( $p = 0,026$ ), der  $HF_{max}$  ( $p = 0,004$ ) sowie der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $p < 0,001$ ). Die weiteren erhobenen Parameter Körpergröße, wöchentliches Trainingspensum, Magermasse sowie das ermittelte Perzentil, auf Grundlage der  $VO_{2max}$  weisen im Mittel keine Signifikanzen zwischen jungen Athleten und Altersklassensportlern auf (s. Tab. 21).

Tab. 21. Altersspezifische Charakterisierung des Probandenkollektivs

	Junge Sportler		Alte Sportler	
	MW	SD	MW	SD
Größe (m)	1,76	0,10	1,74	0,09
Gewicht (kg)	64,94	10,08	74,16	10,97*
Alter (J)	24,35	3,28	52,63	7,14**
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	21,05	2,13	24,64	2,69**
Sport pro Woche (h)	8,95	3,66	8,26	2,75
FM (%)	12,05	6,55	17,40	7,84*
Magermasse (kg)	57,24	10,31	61,30	9,93
$HF_{max}$ (S/min)	179,50	12,39	167,68	11,28*
$VO_{2max}$ (ml/min/kg)	52,55	8,33	43,52	7,63**
KUADC Perzentil $VO_{2max}$	89,24	11,12	79,53	20,20

\* $p < 0,05$  und \*\* $p < 0,001$

### 5.3.1 Physikalische Leistung, Ermüdung sowie Erholung

Nachfolgend werden die maximalen Leistung, die durchschnittlichen Leistung sowie der prozentuale Leistungsabfall innerhalb der 30-sekündigen Belastung für jeden einzelnen WAnT und die unterschiedlichen Testdesigns mit 1-minütiger, 3-minütiger und 10-minütiger Regenerationszeit zwischen den Durchgängen gegenübergestellt und statistisch überprüft. Unabhängig von der Länge der aktiven Pausenzeit erreichten die jungen Probanden sowohl bei der maximalen als auch der durchschnittlichen Leistung im Mittel in allen WAnTs höhere Wattwerte. Bei beiden Gruppen ist über den Testverlauf ein stetiger Abfall der maximalen und durchschnittlichen Leistung zu verzeichnen. Der prozentuale Leistungsabfall innerhalb des jeweiligen All-Out-Tests zeigt dahingegen bei länger werdenden Pausenzeiten immer geringere Differenzen zwischen jungen und alten Probanden. Bei 1-minütiger Pausenzeit zwischen den jeweiligen WAnTs wird ersichtlich, dass die jungen Sportler im Durchschnitt in allen Durchgängen einen höheren maximalen sowie durchschnittlichen Wattwert erzielen. In beiden Gruppen ist im ersten Versuch auch die höchste Leistung erreicht worden. Der Leistungsabfall während des jeweiligen 30-sekündigen All-Out-Tests weist sowohl bei den jungen als auch alten Probanden im ersten WAnT den höchsten Prozentsatz auf. Bei den jungen Sportlern nimmt die prozentuale Ermüdung anschließend von Versuch zu Versuch ab,

währenddessen sie bei den alten Probanden im letzten Durchgang noch einmal minimal ansteigt (s. Tab. 22).

Tab. 22. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit einer Minute Pausenzeit von jungen und alten Sportlern

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
Junge Sportler	10,74	2,34	8,42	1,26	7,89	1,23	7,72	1,21
Alte Sportler	9,21	1,79	7,55	1,10	6,99	1,23	6,97	1,32
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
Junge Sportler	7,23	1,91	6,12	1,48	5,76	1,27	5,62	1,17
Alte Sportler	6,00	1,50	5,13	1,18	4,88	1,18	4,86	1,21
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
Junge Sportler	32,38	11,74	27,80	10,11	27,28	8,41	26,99	10,93
Alte Sportler	34,81	11,77	32,10	12,34	30,16	12,42	30,29	11,36

Die grafische Gegenüberstellung der maximalen Leistungen im Vergleich von jungen zu alten Probanden zeigt signifikante Mittelwertunterschiede in dem WAnT1 ( $10,74 \pm 2,34$  vs.  $9,20 \pm 1,79$  W/kg,  $p = 0,03$ ), WAnT2 ( $8,42 \pm 1,26$  vs.  $7,55 \pm 1,10$  W/kg,  $p = 0,03$ ) und WAnT3 ( $7,89 \pm 1,23$  vs.  $6,99 \pm 1,23$ ,  $p = 0,03$ ) auf (s. Abb. 78). Mit zunehmender Testdauer nimmt die Differenz in der maximal erreichten Tretleistung zwischen beiden Gruppen ab. Ein stetiger Abfall der maximalen Leistung über den Testverlauf ist ebenfalls bei beiden Probandengruppen zu verzeichnen.

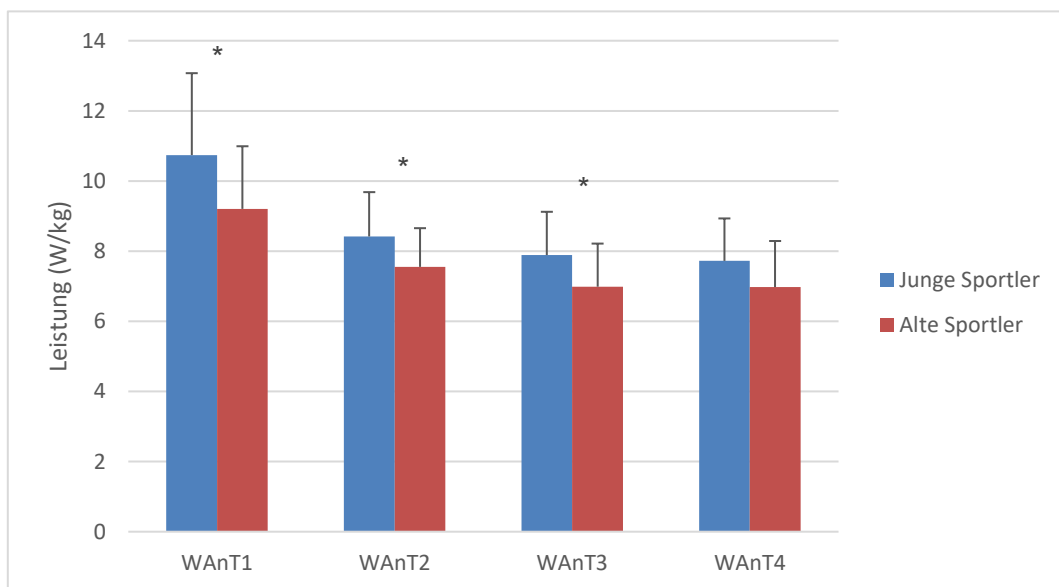


Abb. 78. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

In der Erholungsfähigkeit der Muskulatur, anhand der Reproduzierbarkeit der maximalen Leistung im Vergleich zum vorangegangenen WAnT, kommt es zwischen beiden Stichproben zu keinen signifikanten Mittelwertunterschieden (s. Abb. 79). Allerdings zeigt sich, dass die alten Probanden im zweiten sowie vierten 30-sekündigen All-Out-Test eine geringere prozentuale Veränderung in der Leistung verglichen mit der vorangegangenen Belastung aufweisen ( $80,25 \pm 11,78$  vs.  $83,36 \pm 10,68$  %,  $p = 0,395$  und  $98,50 \pm 10,83$  vs.  $100,44 \pm 14,21$  %,  $p = 0,63$ ). Lediglich im dritten WAnT erreichen die jungen Sportler eine höhere Reproduzierbarkeit der maximalen Leistung ( $93,87 \pm 8,05$  vs.  $92,52 \pm 9,15$  %,  $p = 0,63$ ).

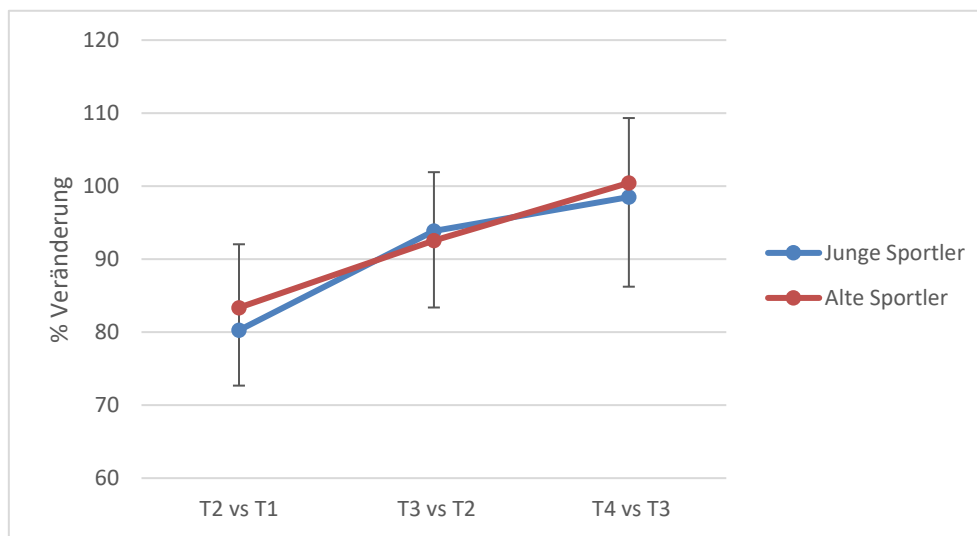


Abb. 79. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Wie bereits bei der maximalen Leistung erreichen die jungen Probanden auch bei der durchschnittlichen Tretleistungen in allen vier WAnTs im Mittel höhere Wattwerte (s. Abb. 80). Die Mittelwertunterschiede sind im ersten ( $7,23 \pm 1,91$  vs.  $6,00 \pm 1,50$  W/kg,  $p = 0,03$ ), zweiten ( $6,12 \pm 1,48$  vs.  $5,13 \pm 1,18$  W/kg,  $p = 0,03$ ) und dritten Versuch ( $5,76 \pm 1,27$  vs.  $4,88 \pm 1,18$  W/kg,  $p = 0,03$ ) als signifikant zu bezeichnen. Auch bei der durchschnittlichen Leistung ist mit zunehmender Testdauer eine Verringerung der Differenz zwischen beiden Gruppen zu verzeichnen. Ebenfalls ist ein stetiger Abfall der durchschnittlichen Leistung über den Testverlauf bei beiden Altersgruppen festzustellen.

In der Erholungsfähigkeit der Muskulatur kommt es bei den Altersklassensportlern zu einer besseren Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Tretleistung im Vergleich zum vorangegangenen WAnT (s. Abb. 81). Sowohl im zweiten ( $85,52 \pm 7,54$  vs.  $86,38 \pm 7,02$  %,  $p = 0,72$ ), dritten ( $94,58 \pm 4,59$  vs.  $95,04 \pm 5,22$  %,  $p = 0,77$ ) als auch vierten Durchgang ( $98,01 \pm 5,01$  vs.  $99,72 \pm 6,13$  %,  $p = 0,35$ ) erreichen sie eine geringere prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung verglichen

mit der vorherigen 30-sekündigen Belastung. Die Mittelwertunterschiede sind allerdings nicht signifikant.

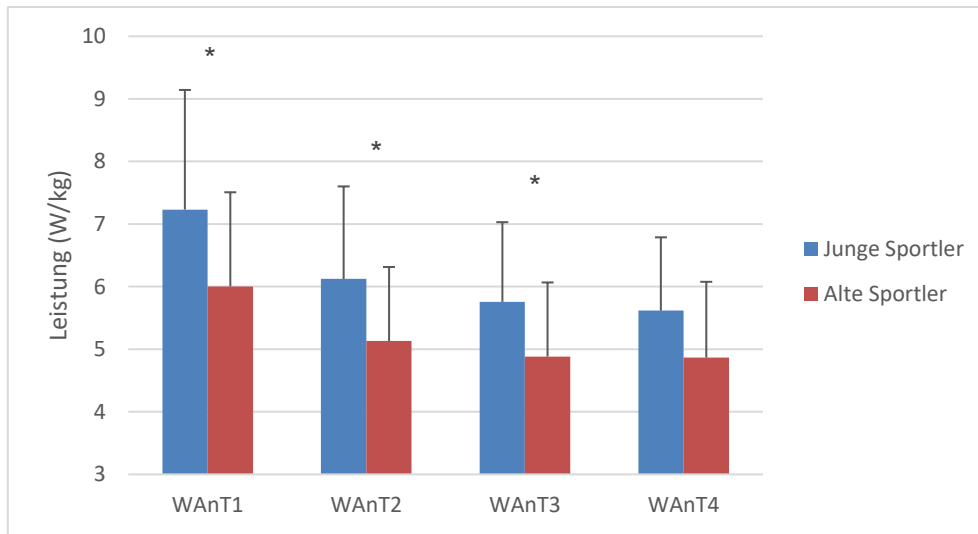


Abb. 80. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

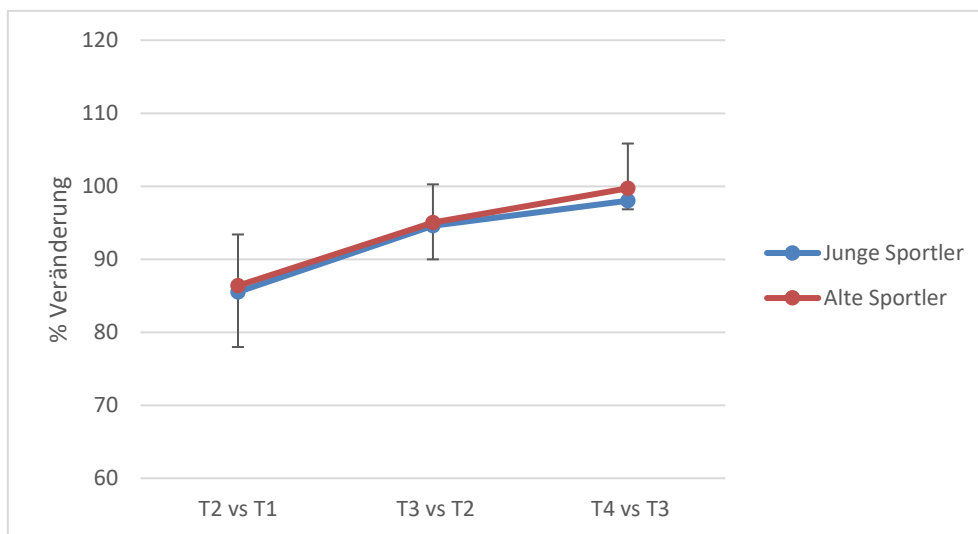


Abb. 81. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Der prozentuale Leistungsabfall innerhalb der jeweiligen 30 Sekunden zeigt zwar Unterschiede zwischen beiden Gruppen auf, die Mittelwertunterschiede sind allerdings nicht signifikant (siehe Abb. 82). In allen vier Durchgängen weisen die jungen Probanden einen geringen prozentualen Leistungsabfall auf ( $32,38 \pm 11,74$

vs.  $34,81 \pm 11,77 \%$ ,  $p = 0,5$ ;  $27,80 \pm 10,11$  vs.  $32,10 \pm 12,34 \%$ ,  $p = 0,24$ ;  $27,28 \pm 8,41$  vs.  $30,16 \pm 12,42 \%$ ,  $p = 0,4$  und  $26,99 \pm 10,93$  vs.  $30,29 \pm 11,36 \%$ ,  $p = 0,36$ ). Dabei wird ersichtlich, dass bei beiden Stichproben im ersten WAnT durchschnittlich der höchste Leistungsabfall zu verzeichnen ist. Währenddessen die jungen Sportler im zweiten bis vierten Versuch eine Stabilisierung dieser erreichen, weisen die alten Probanden eine höhere Schwankung im Leistungsabfall auf.

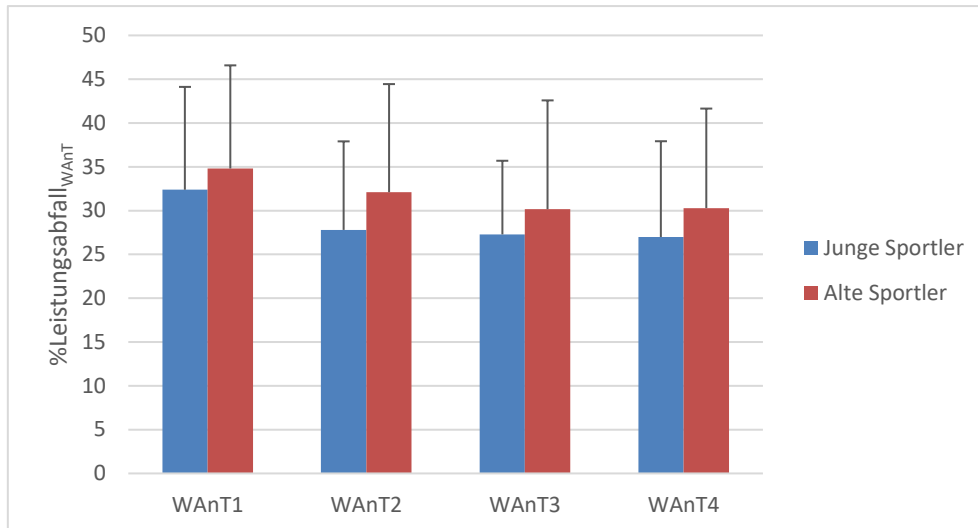


Abb. 82. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit einer Minute Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

Inwiefern es einen Zusammenhang zwischen dem Alter und der Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall gibt, wird in der folgenden Abbildung 83 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass eine kleine Korrelation zwischen beiden Variablen bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen den jeweiligen WAnTs besteht ( $r = 0,21$ ).



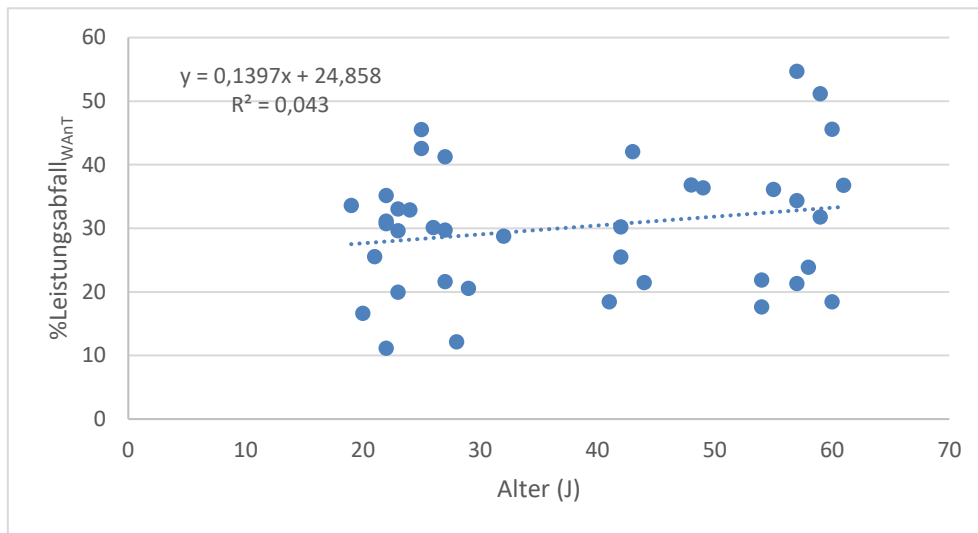


Abb. 83. Korrelation des Alters und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen jungen und alten Sportlern

Der Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall bei kurzer Pausenzeit ist sowohl bei den jungen als auch den alten Probanden mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r = -0,80$  bzw.  $r = -0,79$  als groß zu bezeichnen (s. Abb. 84).

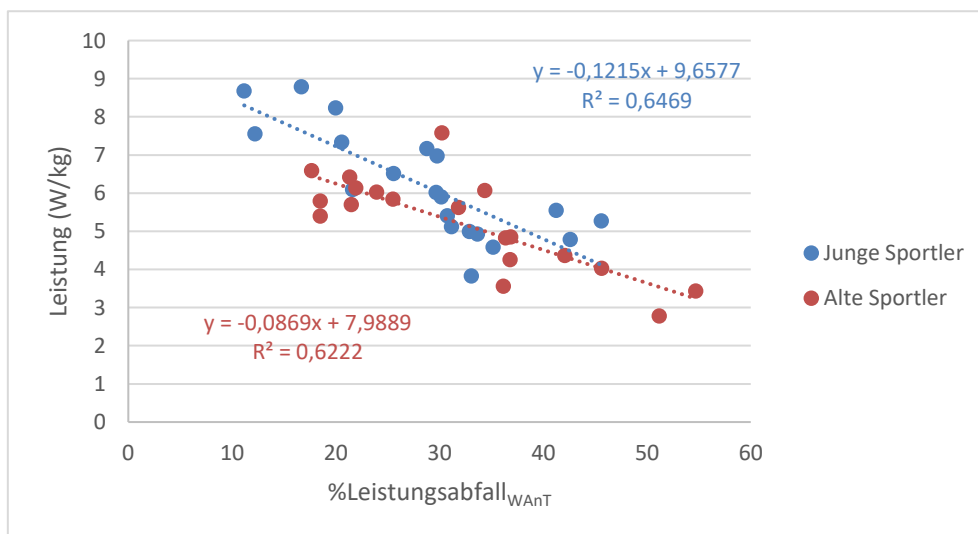


Abb. 84. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von einer Minute zwischen jungen und alten Sportlern

Eine Verlängerung der Regenerationszeiten auf drei Minuten zwischen den einzelnen WAnTs führt zu ähnlichen Ergebnissen, wie sie bereits bei 1-minütiger Pausenzeit dargestellt werden konnten. Auch bei diesem Testdesign können die jungen Probanden bei maximaler und durchschnittlicher Leistung in allen Durchgängen im Mittel höhere Wattwerte erzielen. Des Weiteren erreichen beide

Gruppen im ersten Versuch die höchsten Wattleistungen mit anschließend stetigem Leistungsabfall über den kompletten Testverlauf sowohl bei jungen als auch alten Sportlern. Weiterhin fällt der prozentuale Leistungsabfall innerhalb der 30 Sekunden Belastung bei den jungen Probanden geringer aus. Allerdings sind die Differenzen zwischen beiden Gruppen kleiner als bei 1-minütiger Pausenzeit (s. Tab. 23).

Tab. 23. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit von jungen und alten Sportlern

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
Junge Sportler	10,95	2,14	9,62	1,69	8,98	1,58	8,49	1,41
Alte Sportler	9,30	1,92	8,30	1,76	8,08	1,37	7,95	1,49
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
Junge Sportler	7,25	1,99	6,65	1,70	6,30	1,58	6,17	1,49
Alte Sportler	6,09	1,60	5,67	1,51	5,47	1,41	5,46	1,41
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
Junge Sportler	33,94	11,68	30,98	11,72	30,13	9,72	27,48	10,28
Alte Sportler	34,58	11,07	31,76	12,65	32,64	12,11	31,46	12,42

Die Mittelwertunterschiede zwischen jungen und alten Sportlern weisen in den ersten beiden WAnTs Signifikanzen auf ( $10,95 \pm 2,14$  vs.  $9,30 \pm 1,92$  W/kg,  $p = 0,02$  und  $9,62 \pm 1,69$  vs.  $8,30 \pm 1,76$  W/kg,  $p = 0,02$ ). Mit zunehmendem Testverlauf werden die Differenzen zwischen beiden Gruppen geringer (s. Abb. 85). Ein stetiger Abfall der maximalen Leistung ist bei beiden Altersgruppen innerhalb des Testverlaufes sichtbar.

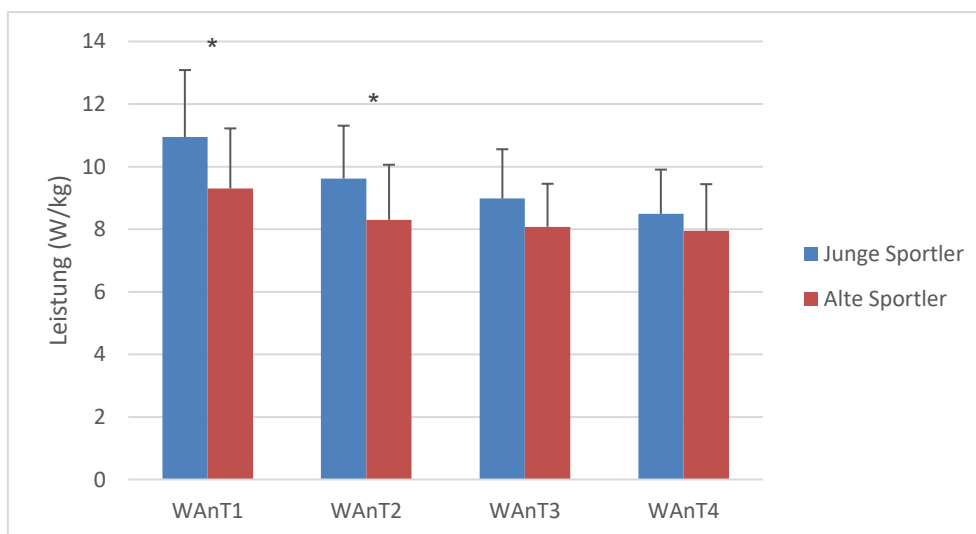


Abb. 85. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

Bei der Betrachtung der muskulären Erholungsfähigkeit zeigt sich, dass die Altersklassensportler im zweiten, dritten und vierten Versuch besser in der Lage sind, die vorherige maximale Leistung zu reproduzieren als die jungen Sportler ( $88,74 \pm 9,89$  vs.  $89,66 \pm 7,23$  %,  $p = 0,74$ ;  $93,72 \pm 7,66$  vs.  $98,71 \pm 11,82$  %,  $p = 0,12$  und  $95,17 \pm 10,01$  vs.  $98,58 \pm 9,45$  %,  $p = 0,28$ ). Die Mittelwertunterschiede weisen allerdings keine Signifikanzen zwischen beiden Stichproben auf (s. Abb. 86).

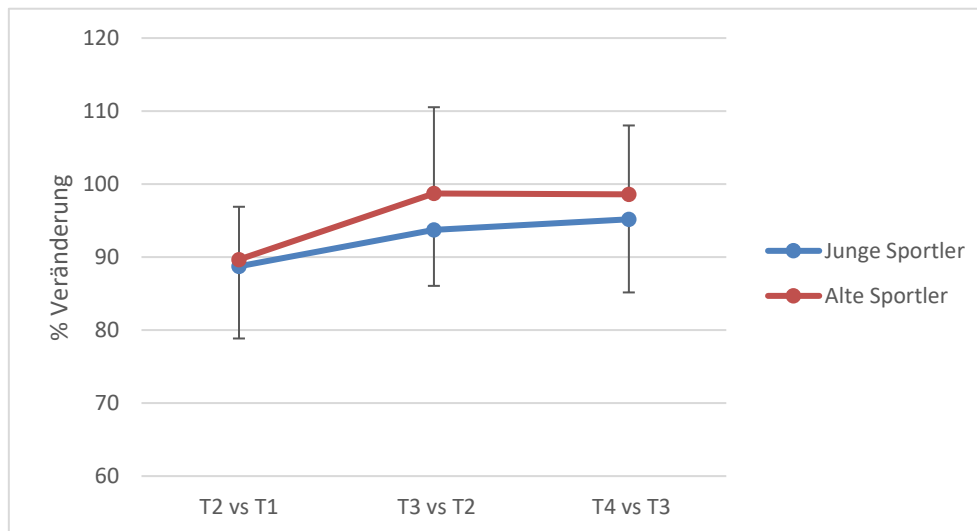


Abb. 86. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Die durchschnittliche erreichte Leistung während der WAnTs bei einer aktiven Pausenzeit von drei Minuten zeigt Differenzen zwischen beiden Altersgruppen auf (s. Abb. 87). Die jungen Probanden erzielen in allen vier Durchgängen höhere durchschnittliche Wattwerte ( $7,25 \pm 1,99$  vs.  $6,09 \pm 1,60$  W/kg,  $p = 0,054$ ;  $6,65 \pm 1,70$  vs.  $5,67 \pm 1,51$  W/kg,  $p = 0,06$ ;  $6,30 \pm 1,58$  vs.  $5,47 \pm 1,41$  W/kg,  $p = 0,09$  und  $6,17 \pm 1,49$  vs.  $5,46 \pm 1,41$  W/kg,  $p = 0,13$ ). Die Mittelwertunterschiede weisen zwar statistische Tendenzen zwischen beiden Stichproben auf, sind allerdings nicht signifikant. Ebenfalls ist ein stetiger Abfall der durchschnittlichen Leistung über den Testverlauf bei beiden Probandengruppen festzustellen.

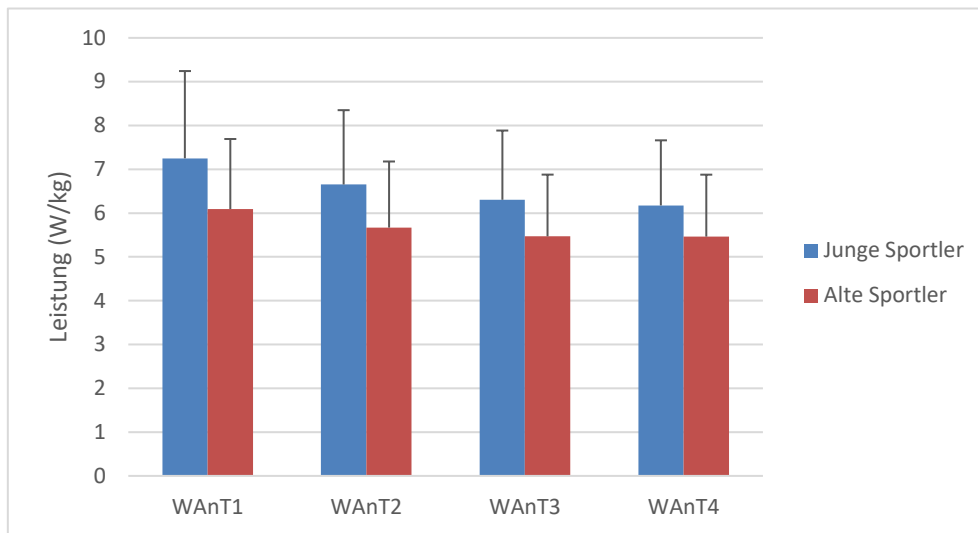


Abb. 87. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

Wie bereits bei 1-minütiger Pausenlänge sind die alten Sportler in der Lage die durchschnittliche Leistung sowohl im zweiten ( $92,47 \pm 5,57$  vs.  $93,06 \pm 4,47$  %,  $p = 0,71$ ), dritten ( $95,08 \pm 4,60$  vs.  $96,93 \pm 5,78$  %,  $p = 0,27$ ) und auch vierten WAnT ( $98,28 \pm 3,29$  vs.  $99,97 \pm 4,16$  %,  $p = 0,17$ ) besser zu reproduzieren als die jungen Probanden (s. Abb. 88). Die Mittelwertunterschiede sind allerdings sehr gering und als nicht signifikant einzuschätzen.

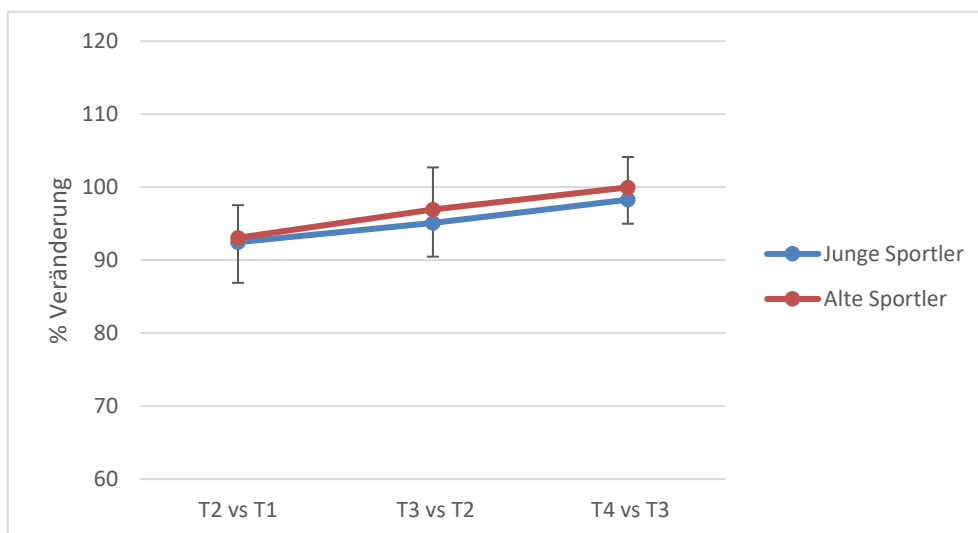


Abb. 88. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

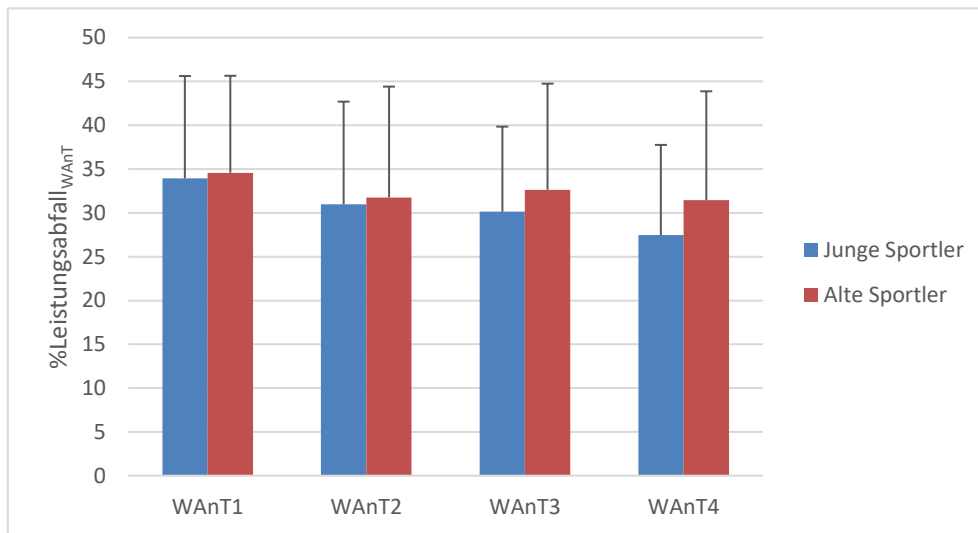


Abb. 89. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit drei Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall innerhalb der 30-sekündigen Belastungen ist in dem Testverlauf über die vier WAnTs bei den alten Probanden geringer (s. Abb. 89). Sie verzeichnen in allen vier Durchgängen einen höheren prozentualen Leistungsabfall ( $33,94 \pm 11,68$  vs.  $34,58 \pm 11,07$  %,  $p = 0,86$ ;  $30,98 \pm 11,72$  vs.  $31,76 \pm 12,65$  %,  $p = 0,84$ ;  $30,13 \pm 9,72$  vs.  $32,64 \pm 12,11$  %,  $p = 0,48$  sowie  $27,48 \pm 10,28$  vs.  $31,46 \pm 12,42$  %,  $p = 0,28$ ). Die Mittelwertunterschiede sind allerdings nicht signifikant. Auffällig ist, dass die Differenz zwischen beiden Gruppen von Durchgang zu Durchgang größer wird. Anhand der folgenden Grafik (s. Abb. 90) zeigt sich, dass bei einer 3-minütigen Pausenlänge zwischen den jeweiligen WAnTs ein kleiner Zusammenhang zwischen dem Alter der Probanden und dem Leistungsabfall innerhalb der Testdurchführung besteht ( $r = 0,11$ ).

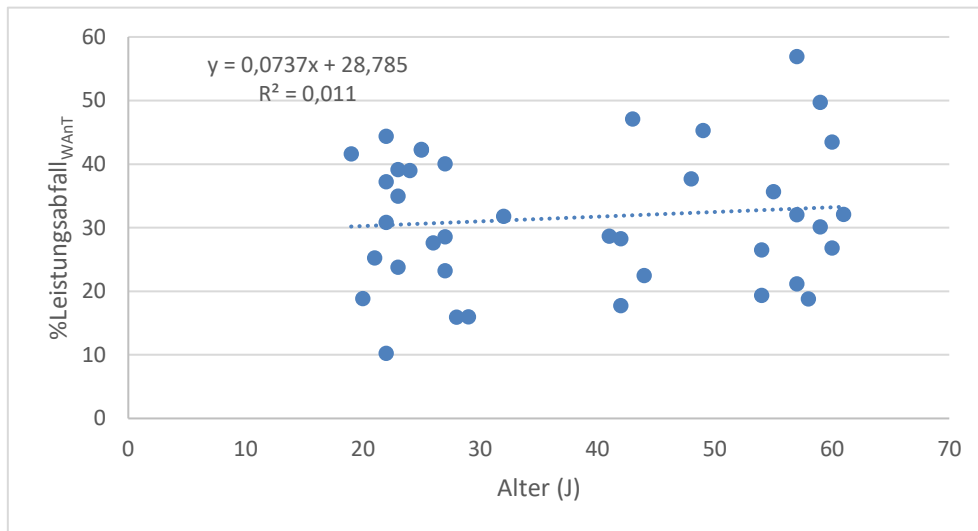


Abb. 90. Korrelation des Alters und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen jungen und alten Sportlern

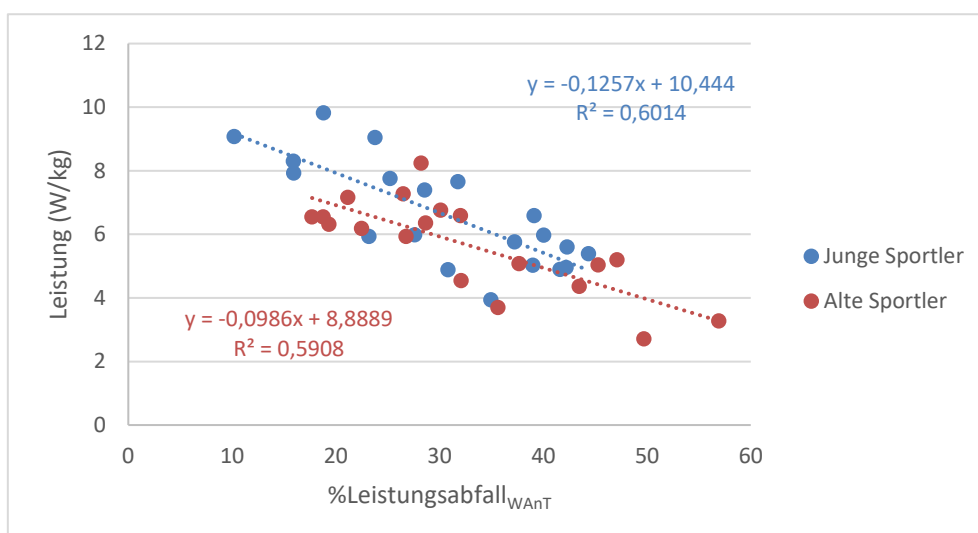


Abb. 91. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall<sub>WAnT</sub> bei einer Pausenlänge von drei Minuten zwischen jungen und alten Sportlern

Der Korrelationskoeffizient von  $r = -0,71$  bei den jungen Probanden und  $r = -0,81$  bei den alten Sportlern zeigt, dass ein großer negativer Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Leistung und dem  $\%Leistungsabfall_{WAnT}$  bei einer Pausenlänge von drei Minuten vorliegt (s. Abb. 91).

Bei einer Pausenzeit von zehn Minuten zwischen den WAnTs zeigt sich ebenfalls, dass die jungen Probanden sowohl bei maximaler als auch durchschnittlicher Leistung höhere Wattwerte erzielen als die Altersklassensportler. Beide Gruppen erzielen im ersten Durchgang im Mittel die höchsten Werte, anschließend ist bei den

alten Probanden ein leichter Abfall der Leistung von Versuch zu Versuch sichtbar. Die jungen Sportler weisen diesen ebenfalls bei der maximalen Tretleistung auf, können sich aber bei der durchschnittlichen Leistung im dritten WAnT leicht steigern. Auch was den prozentualen Leistungsabfall über die jeweilige 30–sekündige Belastung betrifft, zeigen die jungen Sportler in allen vier Durchgängen einen geringeren Leistungsverlust auf. Auch hier ist der höchste Leistungsabfall im ersten WAnT bei beiden Stichproben zu verzeichnen. In den weiteren Versuchen können sowohl die jungen als auch die alten Probanden den Abfall stabilisieren (s. Tab. 24).

Tab. 24. Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Leistung, durchschnittlichen Leistung und %Leistungsabfall während der WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit von jungen und alten Sportlern

	WAnT 1		WAnT 2		WAnT 3		WAnT 4	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>Max. Leistung (W/kg)</b>								
Junge Sportler	10,70	2,13	10,01	2,24	9,86	1,93	9,77	1,58
Alte Sportler	9,24	1,92	8,86	1,69	8,71	1,51	8,59	1,51
<b>Ø Leistung (W/kg)</b>								
Junge Sportler	7,11	2,08	7,03	1,89	7,08	1,78	7,03	1,75
Alte Sportler	6,12	1,63	6,11	1,60	6,08	1,62	6,05	1,61
<b>% Leistungsabfall<sub>WAnT</sub></b>								
Junge Sportler	34,12	10,17	29,69	10,34	28,31	9,33	28,58	9,79
Alte Sportler	33,90	11,94	31,33	12,14	31,04	11,19	30,18	13,20

Anhand der grafischen Gegenüberstellung der im Mittel erreichten maximalen Leistung für die vier WAnTs zeigen sich statistische Differenzen zwischen beiden Altersgruppen (s. Abb. 92). Die Mittelwertunterschiede im WAnT1 ( $10,70 \pm 2,13$  vs.  $9,24 \pm 1,92$  W/kg,  $p = 0,03$ ), WAnT3 ( $9,86 \pm 1,93$  vs.  $8,71 \pm 1,51$  W/kg,  $p = 0,047$ ) und WAnT4 ( $9,77 \pm 1,58$  vs.  $8,59 \pm 1,51$ ,  $p = 0,02$ ) sind dabei signifikant. Ein stetiger Abfall der maximalen Leistung ist bei beiden Altersgruppen über den Testverlauf zu verzeichnen.

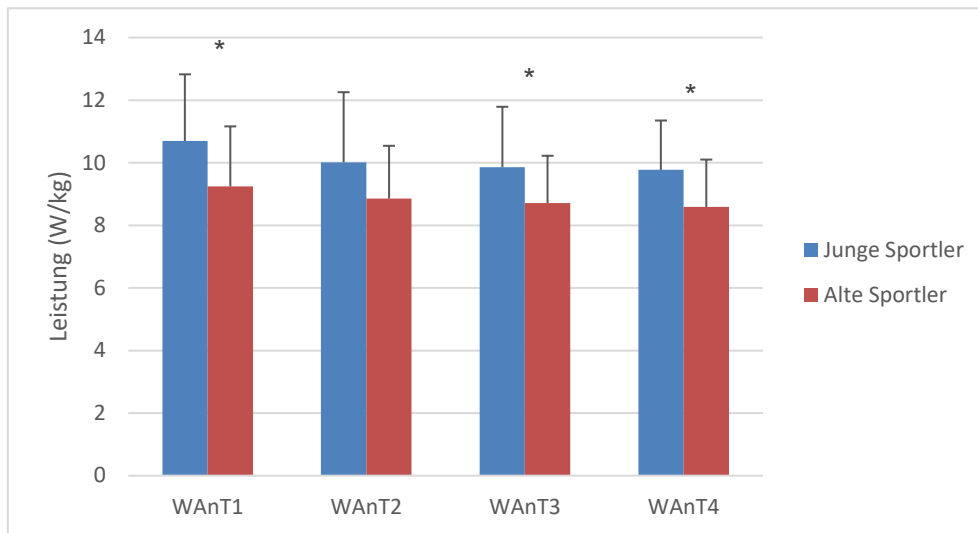


Abb. 92. Maximale Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

Die muskuläre Erholung, in Form der Reproduzierbarkeit der maximalen Leistung im Vergleich zum vorangegangenen WAnT zeigt, dass die jungen Sportler durchschnittlich im dritten ( $99,23 \pm 7,84$  vs.  $99,12 \pm 9,00$  %,  $p = 0,97$ ) und vierten Versuch ( $100,20 \pm 8,90$  vs.  $98,70 \pm 6,52$  %,  $p = 0,55$ ) näher an ihre vorherige maximale Leistung herankommen, währenddessen die alten Probanden im zweiten Durchgang ( $93,58 \pm 9,31$  vs.  $96,63 \pm 10,30$  %,  $p = 0,34$ ) die Wattzahl besser wiedergeben können (s. Abb. 93). Die Mittelwertunterschiede sind allerdings nicht signifikant.

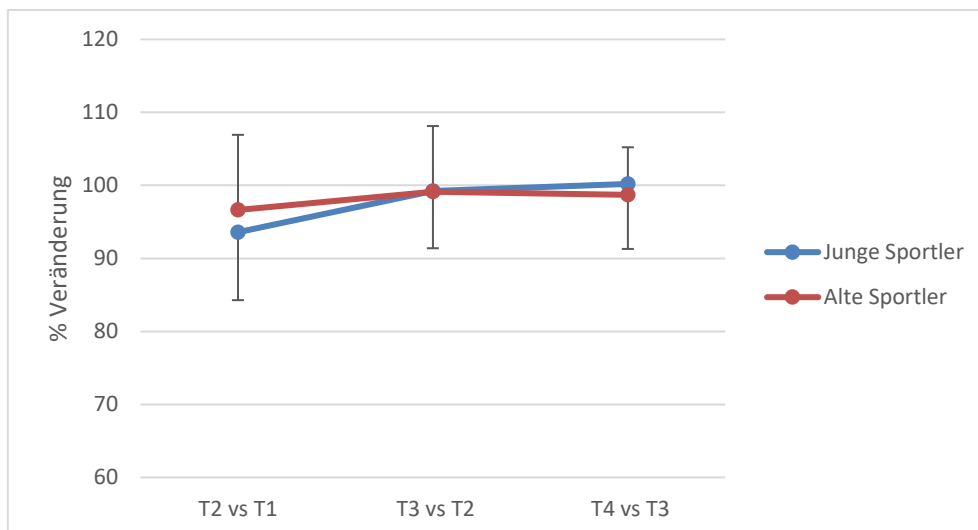


Abb. 93. Prozentuale Veränderung der maximalen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)



Die Betrachtung der durchschnittlich erreichten Leistung in den jeweiligen WAnTs zeigt in keinem der vier Durchgänge einen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen jungen und alten Probanden (s. Abb. 94). Weiterhin lässt sich feststellen, dass beide Altersgruppen sehr konstante durchschnittliche Leistungen über den Testverlauf erbringen können. Ein Leistungsabfall ist dabei kaum ersichtlich.

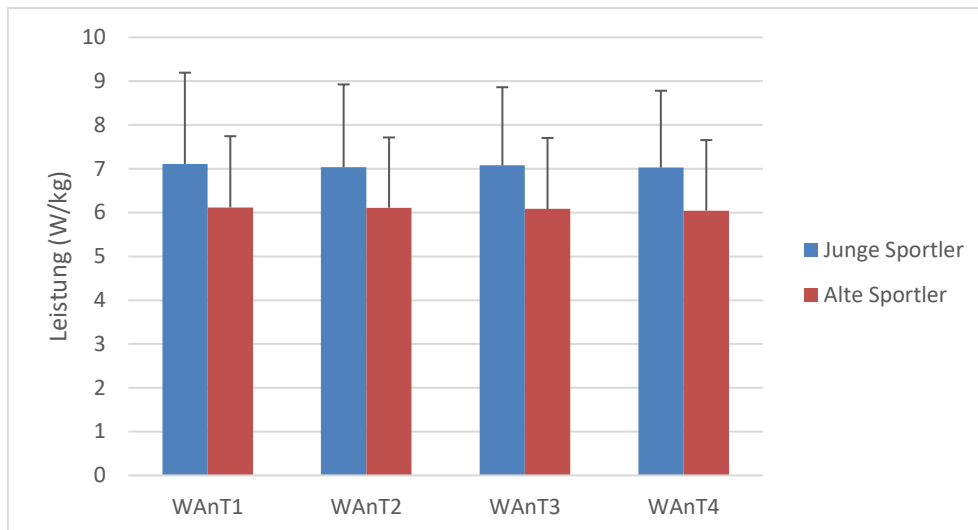


Abb. 94. Durchschnittliche Leistung (W/kg) der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

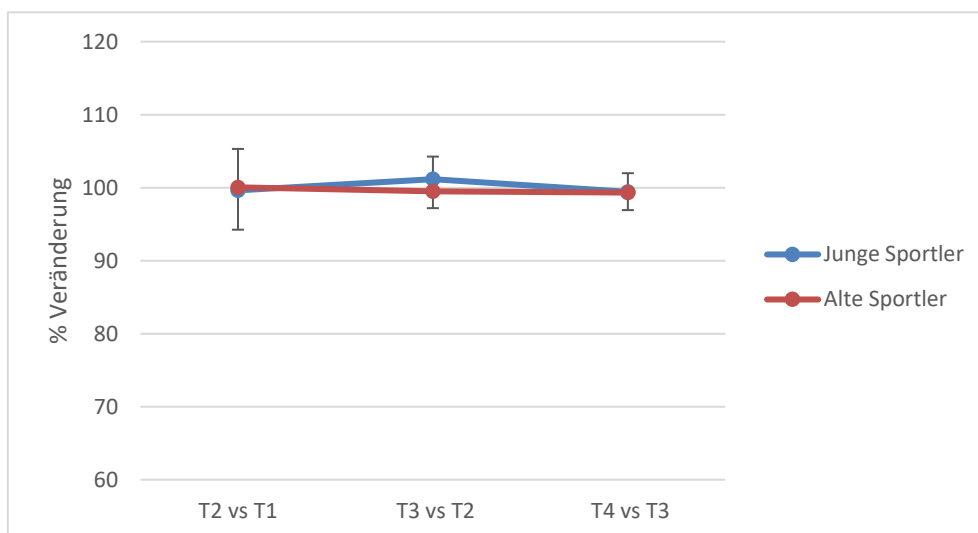


Abb. 95. Prozentuale Veränderung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) im Vergleich zum vorangegangenen WAnT mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern (T1 = WAnT1; T2 = WAnT2; T3 = WAnT3; T4 = WAnT4)

Des Weiteren kann anhand der prozentualen Veränderung der durchschnittlichen Leistung, verglichen mit dem vorherigen WAnT, eine sehr ähnliche Reproduzierbarkeit der Wattzahl in beiden Stichproben festgestellt werden (s. Abb. 95). Allerdings sind die Mittelwertunterschiede sowohl im WAnT2 ( $99,64 \pm 5,39$  vs.  $100,05 \pm 5,26$  %,  $p = 0,81$ ), WAnT3 ( $101,16 \pm 3,96$  vs.  $99,52 \pm 4,74$  %,  $p = 0,25$ ) als auch im WAnT4 ( $99,43 \pm 2,50$  vs.  $99,33 \pm 2,66$  %,  $p = 0,90$ ) nicht signifikant.

Der prozentuale Leistungsabfall innerhalb des jeweiligen 30-sekündigen All-Out-Tests lässt ebenfalls nur eine geringe Differenz zwischen beiden Gruppen erkennen (s. Abb. 96). Im ersten WAnT weisen die alten Sportler einen niedrigeren prozentualen Leistungsabfall auf als die jungen Probanden ( $34,12 \pm 10,17$  vs.  $33,90 \pm 11,94$  %,  $p = 0,95$ ). In den weiteren drei Durchgängen ist die mittlere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall bei den jungen Sportlern etwas geringer ( $29,69 \pm 10,34$  vs.  $31,33 \pm 12,14$  %,  $p = 0,65$ ;  $28,31 \pm 9,33$  vs.  $31,04 \pm 11,19$  %,  $p = 0,41$  und  $28,58 \pm 9,79$  vs.  $30,18 \pm 13,20$  %,  $p = 0,67$ ). Allerdings sind die Mittelwertunterschiede nicht signifikant. Beide Probandengruppen sind über den Testverlauf in der Lage den prozentualen Leistungsabfall auf einem ähnlichen Niveau zu stabilisieren.

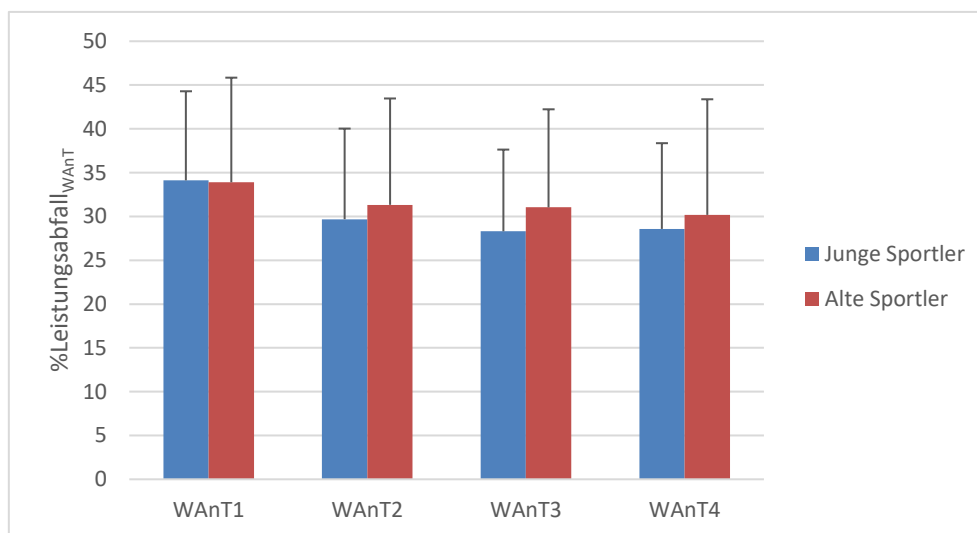


Abb. 96. Prozentualer Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs mit zehn Minuten Pausenzeit zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

Bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen den jeweiligen WAnTs korrelieren das Alter und der %Leistungsabfall<sub>WAnT</sub>, wie bereits bei 1-minütiger und 3-minütiger Regenerationszeit nur sehr schwach miteinander (s. Abb. 97). Der Korrelationskoeffizient beträgt dabei  $r = 0,11$ .

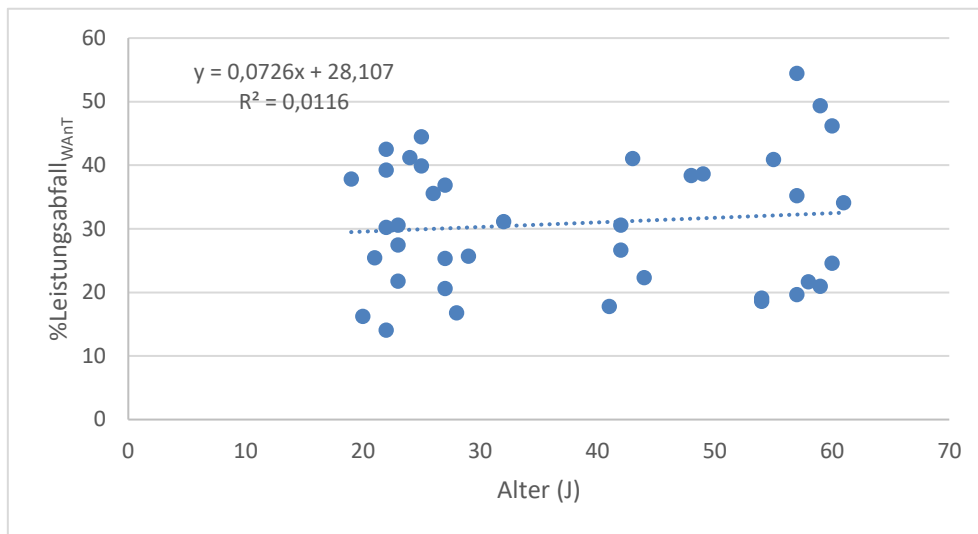


Abb. 97. Korrelation des Alters und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen jungen und alten Sportlern

Wie bereits bei einer Pausenzeit von einer und drei Minuten besteht zwischen der durchschnittlichen Leistung und dem %Leistungsabfall<sub>WAnT</sub>, sowohl bei den jungen Probanden als auch bei den alten Sportlern ein großer negativer Zusammenhang (s. Abb. 98). Die Korrelationskoeffizienten betragen dabei bei beiden Gruppen  $r = -0,71$  beziehungsweise  $r = -0,81$ .

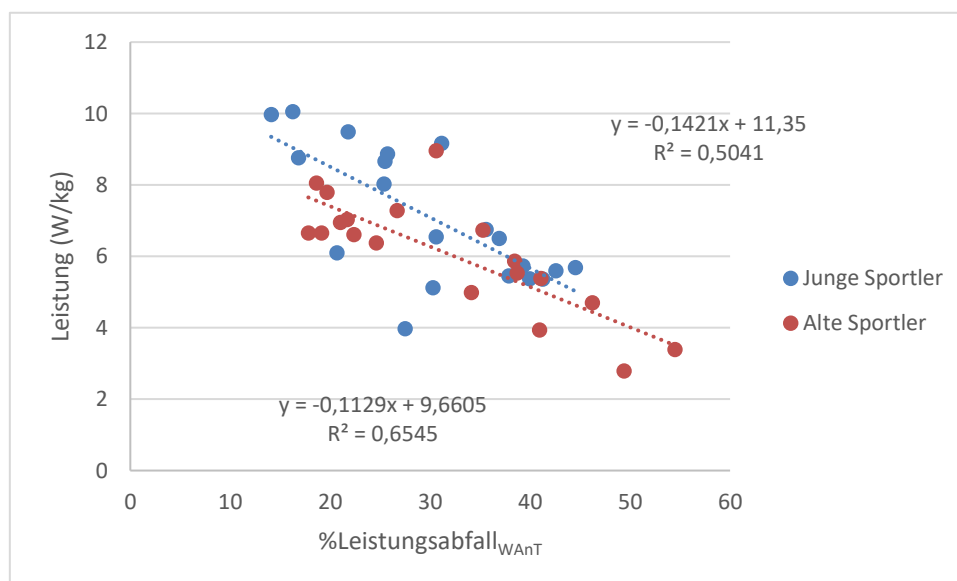


Abb. 98. Korrelation der durchschnittlichen Leistung (W/kg) und dem prozentualen Leistungsabfall bei einer Pausenlänge von zehn Minuten zwischen jungen und alten Sportlern

### 5.3.2 Pausenlänge

Inwiefern die Länge der Regenerationszeit einen Einfluss auf die maximale Leistung hat, wird in der folgenden Grafik sichtbar (s. Abb. 99). Unabhängig von der Pausenlänge erreichen die jungen Sportler im Mittel höhere maximale Leistungen in den vier WAnTs. Die Mittelwertunterschiede sind sowohl bei einer Minute ( $8,69 \pm 1,97$  vs.  $7,68 \pm 1,93$  W/kg,  $p < 0,001$ ), drei Minuten ( $9,51 \pm 1,93$  vs.  $8,41 \pm 1,70$  W/kg,  $p < 0,001$ ) als auch zehn Minuten ( $10,09 \pm 1,98$  vs.  $8,85 \pm 1,65$  W/kg,  $p < 0,001$ ) aktiver Regenerationszeit hochsignifikant. Weiterhin zeigt sich, dass mit zunehmender Pausenlänge die Differenz in der maximal erreichten Leistung zwischen beiden Gruppen ebenfalls zunimmt. Des Weiteren ist mit steigender Länge der Regenerationsphase eine zunehmende Leistungsentwicklung bei den jungen und alten Sportlern zu verzeichnen. Allerdings gibt es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Alter  $F(2; 74) = 0,36$ ,  $p = 0,70$ , partielles  $\eta^2 = 0,01$ . Die Auswertung mittels ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden  $F(2; 76) = 49,24$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,56$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) in der maximalen Leistung zwischen allen drei Testprotokollen. Weiterhin lässt sich ein signifikanter Haupteffekt des Alters feststellen, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 37) = 5,96$ ,  $p = 0,02$ , partielles  $\eta^2 = 0,14$ .

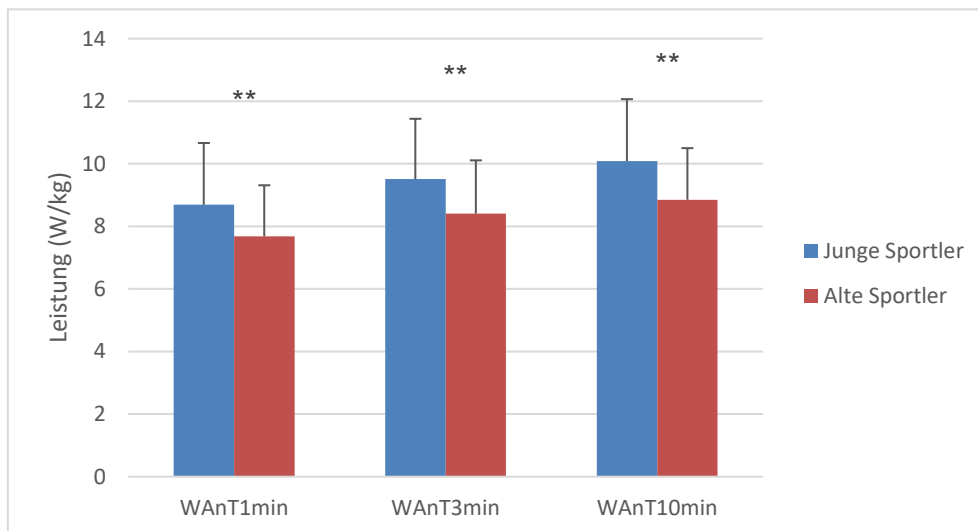


Abb. 99. Mittelwerte mit Standardabweichung der maximalen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

Bei der durchschnittlichen Leistung in Abhängigkeit zu den unterschiedlich langen Pausenzeiten zeigt sich die gleiche Ergebnislage (s. Abb. 100). Auch hier verzeichnen die jungen Probanden höhere durchschnittliche Wattwerte. Die

Mittelwertunterschiede sind ebenfalls sowohl bei einer Minute ( $6,18 \pm 1,59$  vs.  $5,22 \pm 1,34$  W/kg,  $p < 0,001$ ), drei Minuten ( $6,60 \pm 1,72$  vs.  $5,67 \pm 1,48$  W/kg,  $p < 0,001$ ) und zehn Minuten Regenerationszeit ( $7,06 \pm 1,85$  vs.  $6,09 \pm 1,58$  W/kg,  $p < 0,001$ ) hochsignifikant. Die Differenz zwischen beiden Gruppen in der durchschnittlichen Leistung bleibt unabhängig von der Pausenlänge relativ konstant. Allerdings ist auch hier eine steigende Leistungsentwicklung bei zunehmender aktiver Regenerationszeit zu verzeichnen. Weiterhin gibt es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Alter, Greenhouse–Geisser  $F(1,39; 51,33) = 0,082$ ,  $p = 0,85$ , partielles  $\eta^2 = 0,002$ . Eine Auswertung mittels ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden, Greenhouse–Geisser  $F(1,39; 52,89) = 93,36$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,71$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) in der durchschnittlichen Leistung zwischen allen drei Testprotokollen. Einen signifikanten Haupteffekt für das Alter, was für einen signifikanten Unterschied zwischen jungen Athleten und Altersklassensportlern spricht, konnte nicht festgestellt werden,  $F(1, 37) = 3,71$ ,  $p = 0,06$ , partielles  $\eta^2 = 0,09$ .

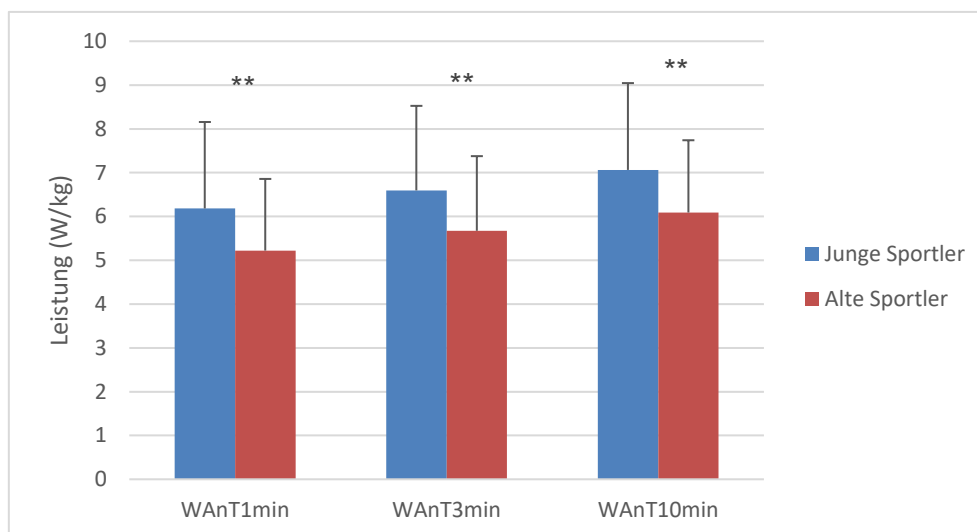


Abb. 100. Mittelwerte mit Standardabweichung der durchschnittlichen Leistung (W/kg) aller vier WAnTs zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten.  
 \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,01$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

Auch bei dem mittleren prozentualen Leistungsabfall innerhalb der vier WAnTs, bezogen auf die unterschiedlich langen Pausenzeiten, werden deutliche Differenzen zwischen beiden Altersgruppen ersichtlich (s. Abb. 101). Die jungen Probanden weisen sowohl bei kurzer ( $28,61 \pm 10,41$  vs.  $31,84 \pm 11,89$  %,  $p = 0,07$ ), mittellanger ( $30,63 \pm 10,93$  vs.  $32,61 \pm 11,90$  %,  $p = 0,28$ ) als auch langer Regenerationszeit ( $30,17 \pm 10,01$  vs.  $31,61 \pm 11,98$  %,  $p = 0,42$ ) eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall auf. Die

Mittelwertunterschiede sind allerdings nicht signifikant. Die jungen Probanden erzielen den geringsten Leistungsabfall bei dem Testprotokoll mit einer Minute Pause zwischen den einzelnen WAnTs sowie den höchsten Abfall mit dreiminütiger Regenerationszeit. Den höchsten Leistungsabfall verzeichnen die Altersklassensportler ebenfalls bei einer Pausenlänge von drei Minuten, die durchschnittlich geringste Widerstandsfähigkeit allerdings bei 10-minütiger Pausenzeit. Weiterhin gibt es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Alter  $F(2; 74) = 0,75, p = 0,48$ , partielles  $\eta^2 = 0,02$ . Die Auswertung mittels ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch nicht signifikant unterscheiden  $F(2; 76) = 1,78, p = 0,18$ , partielles  $\eta^2 = 0,045$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ( $p > 0,05$ ) in dem %Leistungsabfall zwischen den drei Testprotokollen. Abschließend konnte festgestellt werden, dass kein signifikanter Haupteffekt des Alters auftritt, was für keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 37) = 0,46, p = 0,5$ , partielles  $\eta^2 = 0,12$ .

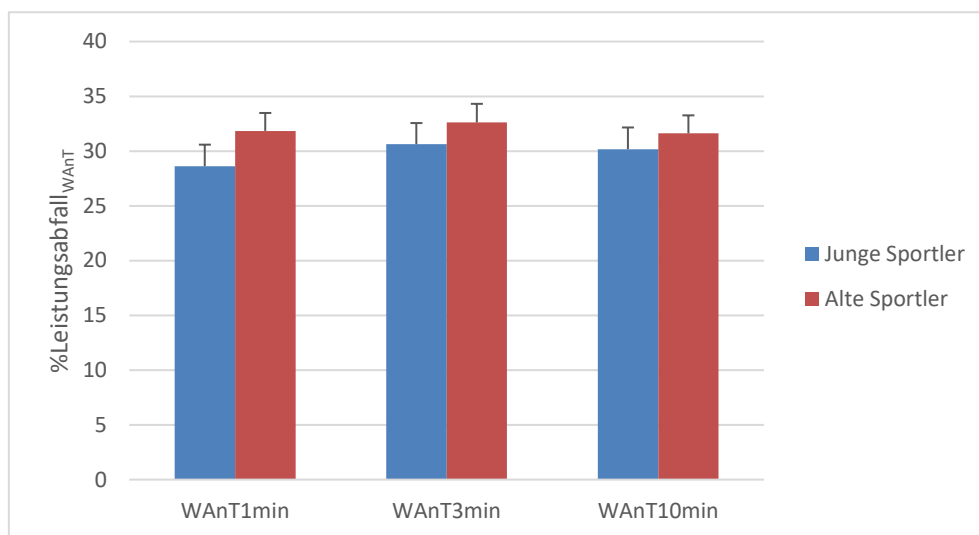


Abb. 101. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls aller vier WAnTs zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten

Währenddessen die jungen Sportler innerhalb der 30-sekündigen Ausbelastung bei allen drei Testprotokollen eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall aufwiesen, lässt sich diese Erkenntnis über den kompletten Testverlauf nicht bestätigen (s. Abb. 102). Bei einer Pausenzeit von einer Minute ( $20,34 \pm 11,97$  vs.  $18,03 \pm 10,38$  %,  $p = 0,52$ ) und drei Minuten ( $13,30 \pm 10,39$  vs.  $9,70 \pm 9,17$  %,  $p = 0,26$ ) erzielen die jungen Probanden einen höheren Leistungsabfall als die alten Sportler. Die Unterschiede zwischen beiden Gruppen sind allerdings nicht signifikant. Bei einer Regenerationszeit von zehn Minuten weisen die alten Probanden einen höheren Leistungsabfall auf, wohingegen die jungen Sportler eine leichte Steigerung der Leistung zwischen dem ersten und

vierten WAnT erzielen können ( $-0,17 \pm 6,30$  vs.  $1,19 \pm 6,16$  %,  $p = 0,50$ ). Auch diese Differenz zeigt keine statistische Signifikanz. Insgesamt lässt sich bei beiden Probandengruppen, unabhängig vom Alter feststellen, dass der Leistungsabfall mit zunehmender Pausenzeit abnimmt. Eine Abnahme der Differenz zwischen beiden Altersklassen ist nur im Vergleich von 1-minütiger zu 10-minütiger Pausenzeit feststellbar. Den größten Unterschied weisen beide Probandengruppen bei 3-minütiger Regenerationslänge auf.

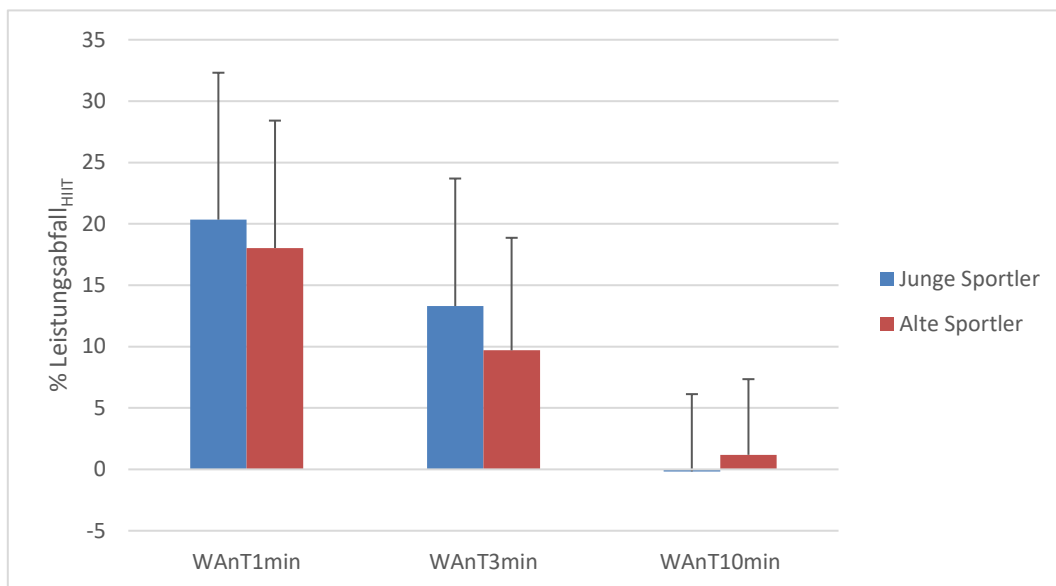


Abb. 102. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Leistungsabfalls vom ersten zum vierten WAnT zwischen jungen und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten

Weiterhin gibt es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Alter, Greenhouse–Geisser  $F(1,59; 58,66) = 1,62$ ,  $p = 0,21$ , partielles  $\eta^2 = 0,42$ . Eine Auswertung mittels ANOVA nach Greenhouse-Geisser-Korrektur zeigt, dass sich die unterschiedlichen Testprotokolle statistisch signifikant unterscheiden  $F(1,59; 58,66) = 85,81$ ,  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,70$ . Ein Bonferroni-korrigierter Post-Hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,001$ ) zwischen allen drei Testprotokollen (s. Tab. 25).

Tab. 25. Ergebnisse des Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für den Innersubjektfaktor %Leistungsabfall

(I)Pausenlänge	(J)Pausenlänge	Mittlere Differenz (I-J)	Standard Fehler	Sig.	95% Konfidenzintervall für die Differenz	
					Untergrenze	Obergrenze
WAnT1min	WAnT3min	7,687	1,197	,000	4,687	10,688
	WAnT10min	18,679	1,760	,000	14,264	23,093
WAnT3min	WAnT10min	10,991	1,277	,000	7,787	14,195

Ebenfalls ist festgestellt worden, dass kein signifikanter Haupteffekt des Alters auftritt, was für keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen spricht,  $F(1, 37) = 0,37$ ,  $p = 0,55$ , partielles  $\eta^2 = 0,01$ .

### 5.3.3 Belastungs- und Erholungsherzfrequenzverhalten

Im folgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse des Einflusses von Alter auf die Belastungs- und Erholungsherzfrequenz grafisch dargestellt und statistisch überprüft. Weiterhin wird die durchschnittliche prozentuale Erholung der Herzfrequenz, bezogen auf die unterschiedlichen Pausenzeiten zwischen den WAnTs, für junge und alte Probanden gegenübergestellt. Unabhängig von der Länge der Regenerationszeit zeigt sich, dass die jungen Sportler im Mittel höhere Belastungs- und Erholungsherzfrequenzen sowie eine höhere prozentuale Erholung der Herzfrequenz aufweisen. Bei differenzierter Betrachtung der mittleren Belastungs- und Pausenherzfrequenzen bei einer Regenerationslänge von einer Minute kommt es zu signifikanten bzw. hochsignifikanten Mittelwertunterschieden zu den Messzeitpunkten WAnT1 ( $171,75 \pm 12,64$  vs.  $156,58 \pm 12,90$  S/min,  $p < 0,001$ ), P1 ( $152,70 \pm 17,31$  vs.  $139,32 \pm 11,79$  S/min,  $p = 0,008$ ), WAnT2 ( $175,70 \pm 12,24$  vs.  $160,95 \pm 11,73$  S/min,  $p < 0,001$ ), P2 ( $155,45 \pm 18,02$  vs.  $144,21 \pm 11,22$  S/min,  $p = 0,03$ ), WAnT3 ( $176,80 \pm 11,90$  vs.  $162,47 \pm 11,00$  S/min,  $p < 0,001$ ), P3 ( $157,40 \pm 17,88$  vs.  $146,63 \pm 11,46$  S/min,  $p = 0,03$ ) und WAnT4 ( $178,45 \pm 11,38$  vs.  $164,63 \pm 10,20$  S/min,  $p < 0,001$ ). Die durchschnittlichen Erholungsherzfrequenzen während der 15-minütigen Ausfahrphase sowie die Ruheherzfrequenz weisen dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen auf (s. Abb. 103).

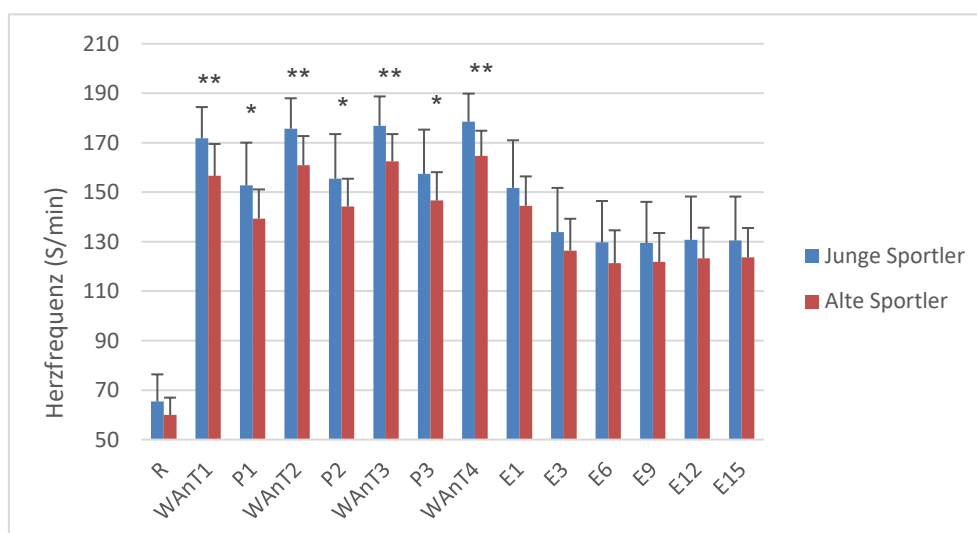


Abb. 103. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von einer Minute (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen jungen und alten Sportlern



In der folgenden Abbildung 104 ist dargestellt worden, wie hoch der prozentuale Abfall der Herzfrequenz innerhalb der Pause beziehungsweise zu den verschiedenen Messzeitpunkten in der 15-minütigen Ausfahrphase ist. Es zeigt sich dabei, dass bei den jungen Probanden die durchschnittliche prozentuale Erholung der Herzfrequenz ausnahmslos zu allen Messzeitpunkten höher ausfällt. Allerdings weisen die Mittelwertunterschiede keine Signifikanzen auf. Weiterhin lässt sich erkennen, dass die Herzfrequenz bei den alten Probanden gegen Ende der Erholungsphase noch einmal leicht ansteigt und die Differenz zwischen beiden Gruppen zunimmt.

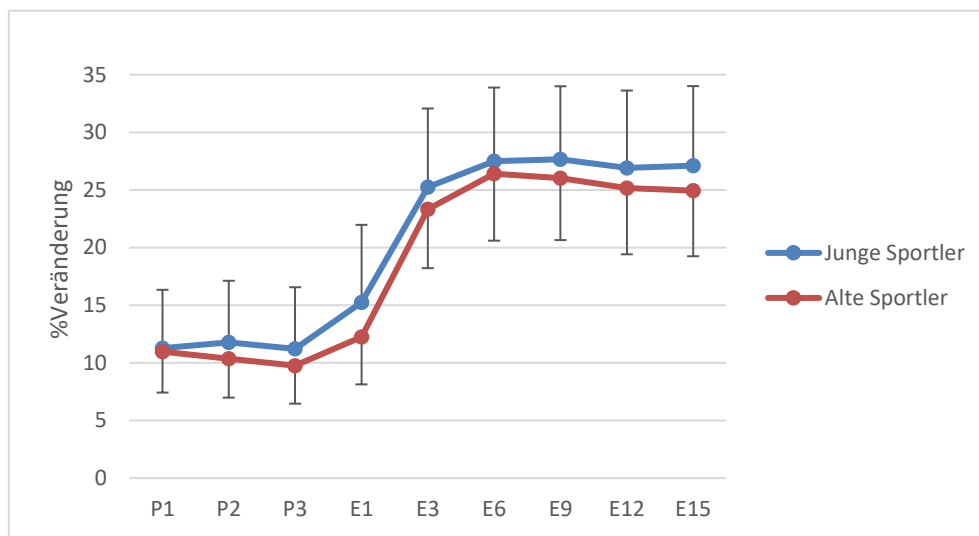


Abb. 104. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von einer Minute nach den WAnTs (P1, P2, P3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

Wie bereits bei 1-minütiger Pausenzeit kommt es auch bei einer Regenerationslänge von drei Minuten zwischen den einzelnen WAnTs zu signifikanten bzw. hochsignifikanten Mittelwertunterschieden in den Belastungs- und Pausenherzfrequenzen zwischen jungen und alten Sportlern (s. Abb. 105). Dabei weisen die Messzeitpunkte WAnT1 ( $170,00 \pm 13,40$  vs.  $155,42 \pm 14,16$  S/min,  $p = 0,002$ ), P1\_1 ( $146,15 \pm 19,48$  vs.  $133,42 \pm 14,96$  S/min,  $p = 0,03$ ), WAnT2 ( $173,70 \pm 12,42$  vs.  $160,16 \pm 12,15$  S/min,  $p = 0,002$ ), P2\_1 ( $150,45 \pm 19,67$  vs.  $138,74 \pm 13,59$  S/min,  $p = 0,04$ ), WAnT3 ( $175,60 \pm 11,53$  vs.  $162,32 \pm 10,59$  S/min,  $p < 0,001$ ) und WAnT4 ( $176,80 \pm 10,47$  vs.  $164,32 \pm 9,99$  S/min,  $p < 0,001$ ) statistische Differenzen auf. Die mittleren Herzfrequenzen in der dritten Minute der jeweiligen Pause sowie in der 15-minütigen Ausfahrphase ergeben keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Altersgruppen.

Der prozentuale Abfall der Herzfrequenz während der Pausenzeiten sowie innerhalb der Nachbelastungsphase weist auch bei einer Regenerationslänge von drei Minuten höhere Werte bei den jungen Probanden auf (s. Abb. 106). Allerdings sind die

Mittelwertunterschiede sowohl in der ersten und dritten Minute nach Beendigung des jeweiligen WAnTs sowie zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten der 15-minütigen Ausfahrphase nicht signifikant. Ähnlich wie bei 1-minütiger Pausenlänge steigt die Herzfrequenz bei den alten Probanden gegen Ende noch einmal leicht an und die Differenz zwischen beiden Gruppen vergrößert sich etwas.

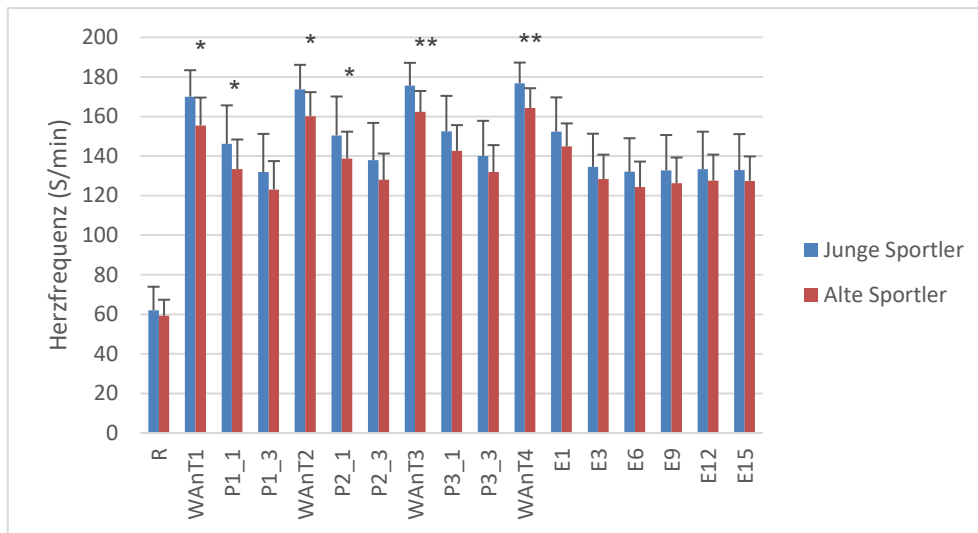


Abb. 105. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von drei Minuten (P1\_1, P1\_3, P2\_1, P2\_3, P3\_1, P3\_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) bzw. \*\* hochsignifikante Differenzen ( $p < 0,001$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

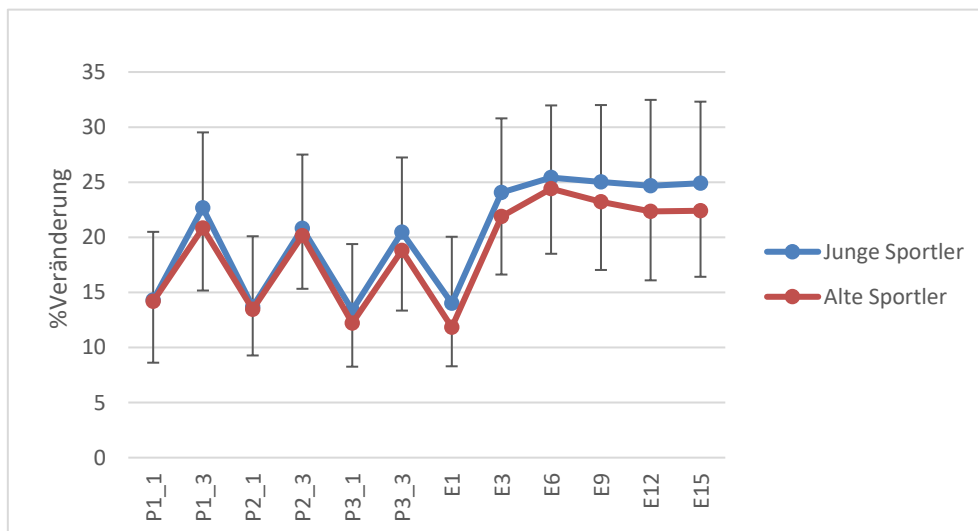


Abb. 106. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von drei Minuten nach den WAnTs (P1\_1, P1\_3, P2\_1, P2\_3, P3\_1, P3\_3) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

Die durchschnittliche Herzfrequenz zwischen jungen und alten Sportlern weist vor allem in der Belastungsphase, am Ende des jeweiligen WAnT signifikante Mittelwertunterschiede auf (s. Abb. 107). Die mittleren Herzfrequenzwerte an den Messzeitpunkten WAnT1 ( $168,75 \pm 11,88$  vs.  $157,26 \pm 12,33$  S/min,  $p = 0,005$ ), WAnT2 ( $175,35 \pm 10,59$  vs.  $165,32 \pm 11,41$  S/min,  $p = 0,007$ ), WAnT3 ( $177,75 \pm 10,23$  vs.  $167,58 \pm 11,31$  S/min,  $p = 0,006$ ) und WAnT4 ( $178,95 \pm 10,61$  vs.  $168,74 \pm 10,83$  S/min,  $p = 0,005$ ) erreichen statistische Differenzen zwischen beiden Probandengruppen. Während der Pausenzeit sind, außer bei P1\_1 ( $144,15 \pm 17,37$  vs.  $133,95 \pm 10,74$  S/min,  $p = 0,03$ ) keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Wie auch bereits bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenzeit ergeben sich innerhalb der 15-minütigen Ausfahrphase keine statistischen Differenzen zwischen den jungen und alten Probanden.

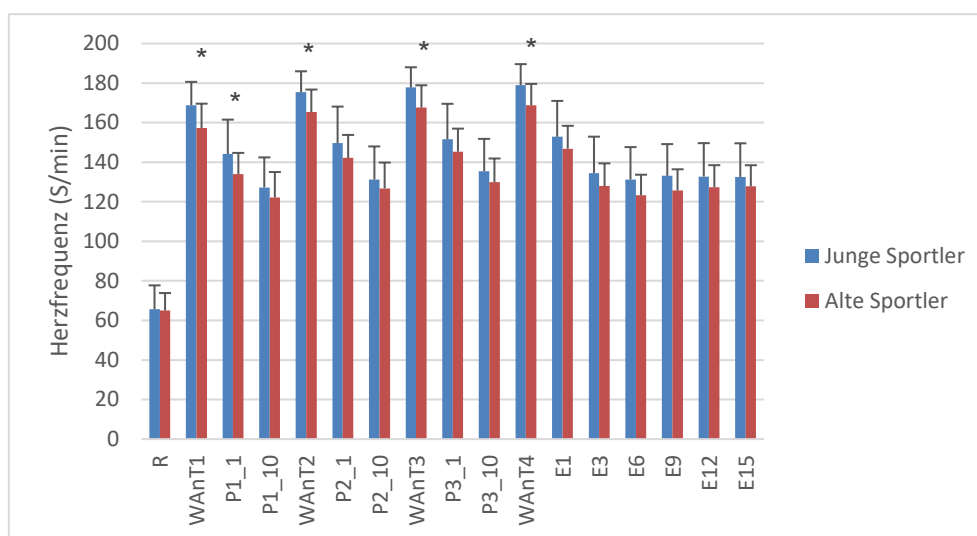


Abb. 107. Durchschnittliche Herzfrequenz des Ruhewertes (R), während der vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4), den aktiven Pausenzeiten von zehn Minuten (P1\_1, P1\_10, P2\_1, P2\_10, P3\_1, P3\_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern. \* signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen jungen und alten Sportlern

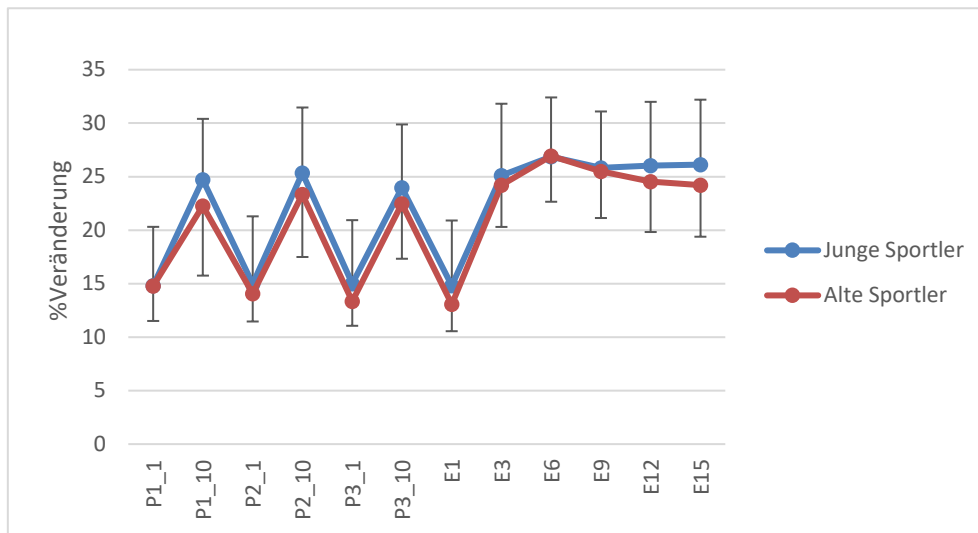


Abb. 108. Prozentuale Erholung der Herzfrequenz innerhalb der aktiven Pausenzeit von zehn Minuten nach den WANTs (P1\_1, P1\_10, P2\_1, P2\_10, P3\_1, P3\_10) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern

Auch bei einer aktiven Pausenzeit von zehn Minuten zwischen den einzelnen WANTs lässt sich die Ergebnislage bestätigen, dass die jungen Probanden eine höhere prozentuale Erholung der Herzfrequenz aufweisen (s. Abb. 108). Die Mittelwertunterschiede sind allerdings weder zu den Messzeitpunkten in der jeweiligen Pause noch in der 15-minütigen Nachbelastungsphase zwischen beiden Probandengruppen signifikant. Am Ende der Ausfahrphase ist ebenfalls wieder ein leichter Anstieg der durchschnittlichen Herzfrequenz bei den alten Probanden zu verzeichnen.

### 5.3.4 Laktatverhalten

In den folgenden Grafiken (s. Abb. 109 A-C) werden die durchschnittlichen Laktatkonzentrationen zwischen beiden Probandengruppen, bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten zwischen den einzelnen WANTs grafisch dargestellt und auf statistische Mittelwertunterschiede überprüft. Weiterhin wird die Laktatabbaurate innerhalb der 15-minütigen Nachbelastungsphase bezogen auf die unterschiedlichen Pausenlängen für beide Altersgruppen ausgewertet (s. Abb. 110). Grundsätzlich zeigt sich, dass es unabhängig von der Länge der Pause zu keinen signifikanten Differenzen bei der durchschnittlichen Laktatkonzentration zwischen jungen und alten Probanden kommt. Innerhalb der Belastungsphase erreichen die jungen Sportler bei allen drei Testprotokollen im Mittel eine höhere Laktatkonzentration, währenddessen der Abtransport des Laktates in der 15-minütigen Ausfahrphase nahezu identisch zwischen beiden Altersgruppen verläuft. Die durchschnittlich höchste Laktatkonzentration weisen die jungen Probanden bei

dem Testdesign mit einer und zehn Minuten Pausenlänge drei Minuten nach dem letzten WAnT auf (E3). Bei einer Regenerationszeit von drei Minuten ist die höchste Laktatkonzentration direkt nach dem letzten WAnT zu verzeichnen. Dabei wird die höchste durchschnittliche Laktatkonzentration bei 3-minütiger Pausenlänge erreicht ( $14,91 \pm 4,70$  mmol/l), gefolgt von dem Testprotokoll mit einer Minute Regeneration ( $13,96 \pm 3,24$  mmol/l) sowie dem Testdesign mit 10-minütiger Pause ( $10,72 \pm 3,45$  mmol/l). Im Unterschied dazu, weisen die alten Sportler sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger und 10-minütiger Pausenlänge die durchschnittlich höchsten Laktatkonzentrationen drei Minuten nach dem letzten WAnT auf (E3). Auch bei den Altersklassensportlern wird die durchschnittlich höchste Laktatkonzentration bei dem Testprotokoll mit drei Minuten Pausenlänge erreicht ( $13,79 \pm 2,95$  mmol/l), gefolgt von dem Testdesign mit einer Minute Regenerationszeit ( $13,68 \pm 2,40$  mmol/l) und 10-minütiger Pause ( $10,80 \pm 2,20$  mmol/l). Die differenzierte Betrachtung der mittleren Laktatkonzentrationen bei einer aktiven Pausenzeit von einer Minute zeigt, dass die jungen Probanden eine höhere Laktatbildungsrate in der Belastungsphase aufweisen. Allerdings sind die Mittelwertunterschiede zu den Messzeitpunkten WAnT1 ( $4,06 \pm 1,25$  vs.  $3,50 \pm 1,23$  mmol/l,  $p = 0,17$ ), WAnT2 ( $9,04 \pm 2,31$  vs.  $8,03 \pm 2,00$  mmol/l,  $p = 0,16$ ), WAnT3 ( $11,76 \pm 2,86$  vs.  $10,81 \pm 2,46$  mmol/l,  $p = 0,28$ ) und WAnT4 ( $13,72 \pm 3,03$  vs.  $12,90 \pm 2,49$  mmol/l,  $p = 0,36$ ) zwischen jungen und alten Sportlern nicht signifikant. Innerhalb der 15-minütigen Ausfahrphase ist beim Abbau der Laktatkonzentration zu den Messpunkten E3 ( $13,96 \pm 3,24$  vs.  $13,68 \pm 2,40$  mmol/l,  $p = 0,76$ ), E6 ( $12,59 \pm 3,55$  vs.  $12,59 \pm 2,16$  mmol/l,  $p = 1$ ), E9 ( $10,86 \pm 3,79$  vs.  $10,74 \pm 2,58$  mmol/l,  $p = 0,91$ ), E12 ( $9,07 \pm 3,56$  vs.  $8,85 \pm 2,53$  mmol/l,  $p = 0,82$ ) und E15 ( $7,04 \pm 3,44$  vs.  $6,79 \pm 1,94$  mmol/l,  $p = 0,79$ ) kaum ein Unterschied zwischen beiden Probandengruppen ersichtlich (s. Abb. 109 A). Bei dem Testprotokoll mit dreiminütiger Pausenzeit gibt es sowohl in der Belastungs- als Erholungsphase sichtbare Unterschiede bei der mittleren Laktatkonzentration zwischen jungen und alten Probanden. Während der Belastungsphase weisen die jungen Sportler zu den Messzeitpunkten WAnT1 ( $4,83 \pm 1,48$  vs.  $3,92 \pm 1,28$  mmol/l,  $p = 0,048$ ), WAnT2 ( $10,49 \pm 2,90$  vs.  $9,13 \pm 2,20$  mmol/l,  $p = 0,1$ ), WAnT3 ( $13,53 \pm 4,04$  vs.  $11,97 \pm 2,93$  mmol/l,  $p = 0,18$ ) und WAnT4 ( $14,91 \pm 4,70$  vs.  $13,57 \pm 3,06$  mmol/l,  $p = 0,3$ ) durchschnittlich höhere Laktatwerte auf. Die ermittelten Differenzen sind lediglich nach dem WAnT1 signifikant. Zu den anderen Messzeitpunkten sind keine statistischen Unterschiede ersichtlich. In der 15-minütigen Erholungsphase stellt sich die Laktatabbaurate nahezu identisch zwischen beiden Gruppen dar. Deswegen ist die mittlere Laktatkonzentration zu den Messzeitpunkten E3 ( $14,67 \pm 4,52$  vs.  $13,79 \pm 2,95$  mmol/l,  $p = 0,48$ ), E6 ( $13,38 \pm 4,68$  vs.  $12,00 \pm 2,91$  mmol/l,  $p = 0,28$ ), E9 ( $11,24 \pm 4,21$  vs.  $10,14 \pm 3,16$  mmol/l,  $p = 0,37$ ), E12 ( $9,28 \pm 3,99$  vs.  $8,36 \pm 2,95$  mmol/l,  $p = 0,43$ ) und E15 ( $7,62 \pm 3,84$  vs.  $6,84 \pm 2,74$  mmol/l,  $p = 0,48$ ) bei den jungen Sportlern höher. Die Mittelwertunterschiede sind allerdings ebenfalls als nicht signifikant zu bezeichnen (s. Abb. 109 B). Im Unterschied zu dem Testprotokollen mit 1-minütiger und 3-minütiger Regeneration zwischen dem jeweiligen WAnT, sind bei dem Testdesign mit zehn Minuten Pausenzeit die

Laktatkonzentrationen zusätzlich in der Pause bestimmt worden. Die jungen Sportler weisen in den Pausenzeiten geringere mittlere Laktatkonzentrationen auf. Allerdings sind die Mittelwertunterschiede zu den Messzeitpunkten P1 ( $6,28 \pm 2,41$  vs.  $6,92 \pm 2,21$  mmol/l,  $p = 0,4$ ), P2 ( $6,99 \pm 3,06$  vs.  $7,54 \pm 2,23$  mmol/l,  $p = 0,53$ ) und P3 ( $8,04 \pm 3,44$  vs.  $8,16 \pm 2,35$  mmol/l,  $p = 0,9$ ) nicht signifikant. Des Weiteren gibt es ebenfalls keine statistischen Differenzen in der durchschnittlichen Laktatkonzentration innerhalb der Belastungs- und Ausfahrphase. Sowohl nach dem jeweiligen WAnT als auch zu den Messzeitpunkten E3 ( $10,72 \pm 3,45$  vs.  $10,80 \pm 2,20$  mmol/l,  $p = 0,93$ ), E6 ( $9,90 \pm 4,05$  vs.  $9,81 \pm 2,44$  mmol/l,  $p = 0,94$ ), E9 ( $8,03 \pm 3,56$  vs.  $8,05 \pm 2,34$  mmol/l,  $p = 0,98$ ), E12 ( $6,41 \pm 3,09$  vs.  $6,58 \pm 2,14$  mmol/l,  $p = 0,85$ ) und E15 ( $5,39 \pm 2,89$  vs.  $5,26 \pm 1,78$  mmol/l,  $p = 0,86$ ) der 15-minütigen Ausfahrphase sind keine Signifikanzen in den Mittelwertunterschieden festzustellen (s. Abb. 109 C).

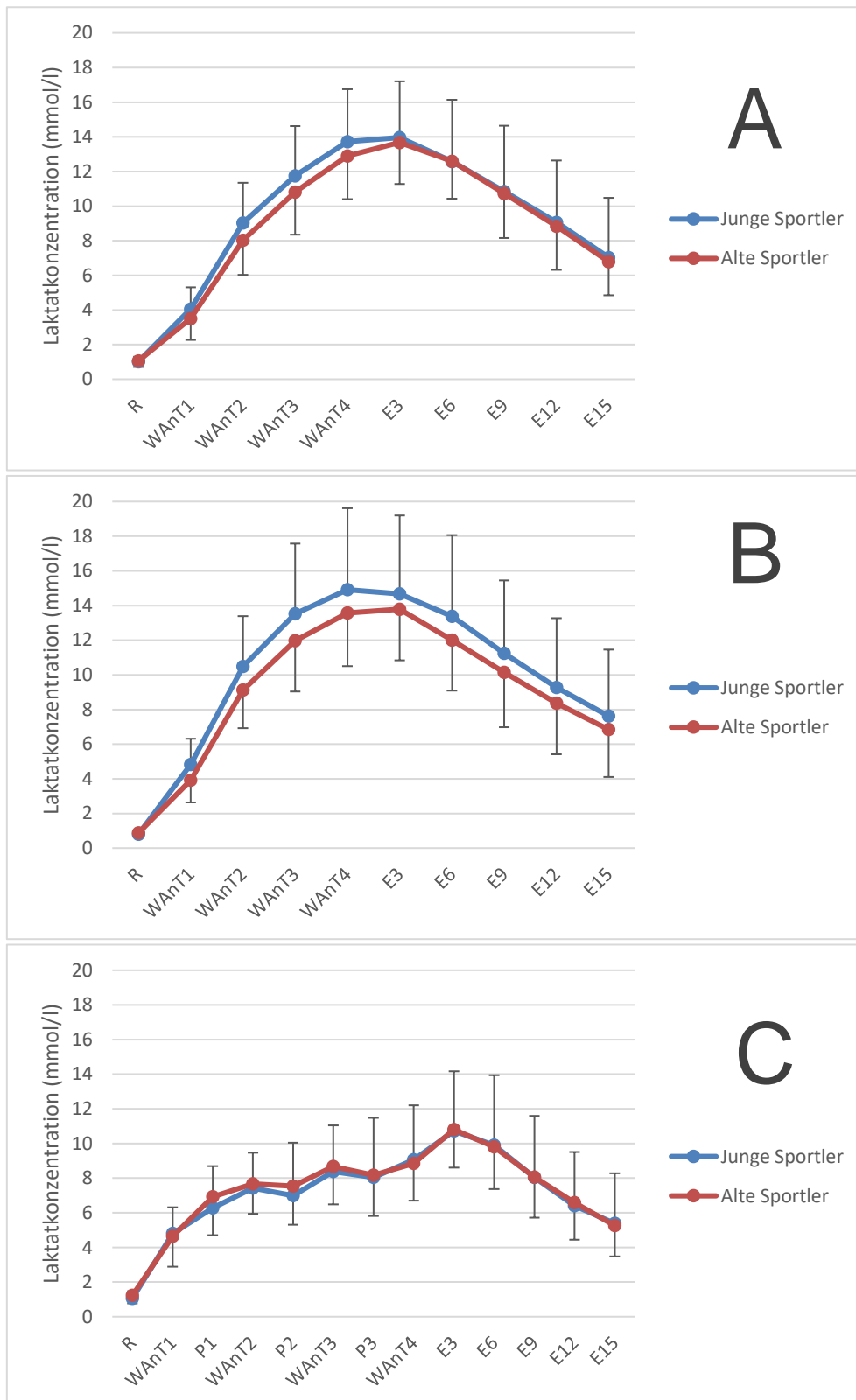


Abb. 109. Durchschnittliche Laktatkonzentration in Ruhe (R), nach den vier WAnTs (WAnT1, WAnT2, WAnT3, WAnT4) sowie der Erholungsphase (E1, E3, E6, E9, E12, E15) zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern bei unterschiedlichen aktiven Pausenzeiten. A: eine Minute Pausenzeit, B: drei Minuten Pausenzeit, C: zehn Minuten Pausenzeit inklusive Laktatkonzentration am Ende der Pause (P1, P2, P3)

Ähnlich wie bei den Verläufen der Laktatakkumulation über den kompletten Testverlauf sowie für die unterschiedlichen Testprotokolle zeigen sich auch bei dem mittleren prozentualen Laktatabbau innerhalb der 15-minütigen Erholungsphase keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probandengruppen (s. Abb. 110). Im Durchschnitt weisen die jungen Probanden bei einer Minute ( $53,25 \pm 16,90$  vs.  $51,58 \pm 10,74$  %,  $p = 0,72$ ), drei Minuten ( $55,59 \pm 16,60$  vs.  $52,87 \pm 12,05$  %,  $p = 0,56$ ) und zehn Minuten Pausenlänge ( $52,76 \pm 13,60$  vs.  $52,53 \pm 9,99$  %,  $p = 0,95$ ) eine minimal höhere Laktatabbaurrate innerhalb der aktiven Erholungsphase auf. Wie bereits erwähnt, sind diese Unterschiede allerdings nicht als signifikant zu bezeichnen. Unter Einbezug der Pausenzeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen ist die mittlere Laktatabbaurrate sowohl innerhalb der Probandengruppe als auch im Vergleich zum anderen Probandenkollektiv nahezu konstant. Die größte Differenz in der mittleren Laktatabbaurrate tritt zwischen den jungen Probanden und den Altersklassensportlern bei dem 3-minütigen Testprotokoll auf.

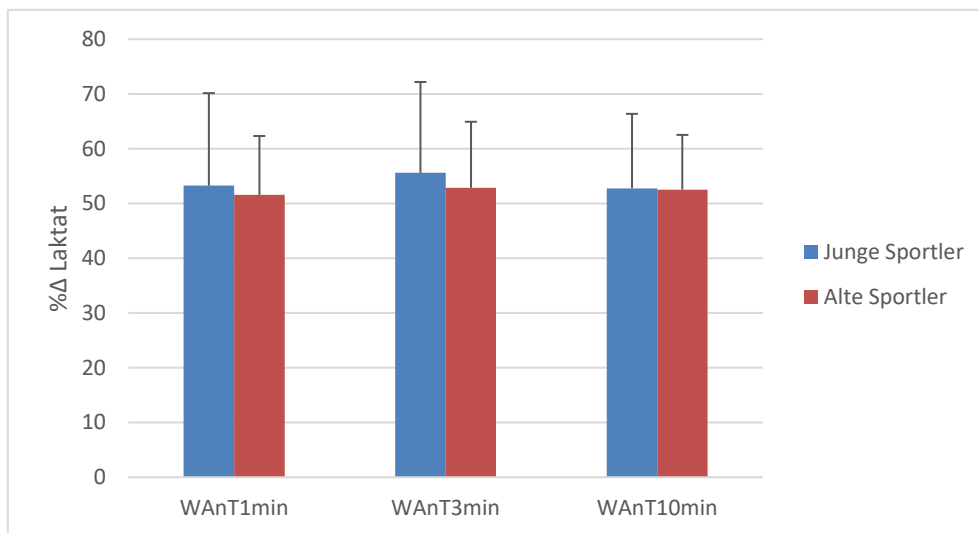


Abb. 110. Mittelwerte mit Standardabweichung des prozentualen Blutlaktatabbaus innerhalb der 15-minütigen aktiven Erholungsphase zwischen jungen Sportlern und alten Sportlern bezogen auf die unterschiedlichen Regenerationszeiten



## 6 Diskussion und Methodenkritik

In dem folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der wissenschaftlichen Studie vor dem Hintergrund der im dritten Kapitel aufgestellten Arbeitshypothesen betrachtet und interpretiert. Darauf aufbauend werden die Untersuchungsergebnisse in den aktuellen Forschungsstand eingeordnet und erste Empfehlungen für die Trainings- und Regenerationssteuerung gegeben.

### *Einfluss des Geschlechtes auf die Belastungs- und Erholungskinetik*

Um eine valide Bearbeitung der aufgestellten Forschungsfragen sicherstellen zu können, liegen, wie bereits in der Ergebnisdarstellung aufgezeigt einheitliche Voraussetzungen hinsichtlich der Ausdauerleistungsfähigkeit vor (Vgl. Kapitel 5.1). Die Probandengruppe der Männer und Frauen unterscheiden sich lediglich im Geschlecht sowie in körperbaulichen Merkmalen, welche auf rein physiologische Unterschiede der Geschlechter zurückzuführen sind. Die Klassifizierung der Ausdauerleistungsfähigkeit anhand des KUADC-Perzentils sowie das Alter, welches ebenfalls einen leistungsvariierenden Einfluss auf die Belastungs- und Erholungskinetik haben könnte, unterscheiden sich bei beiden Probandengruppen statistisch nicht voneinander. Auf dieser Grundlage ist davon auszugehen, dass die im fünften Kapitel aufgeführten Ergebnisse anhand zweier Probandengruppen entstanden sind, welche die gleiche Ausdauerleistungsfähigkeit aufweisen.

Ein erstes Hauptziel dieser vorliegenden Studie beinhaltete die Überprüfung, inwiefern das Geschlecht einen Einfluss auf die Belastungs- und die Erholungskinetik nach lokomotorischen Intervallbelastungen aufweist. Um diese Zielstellung zu bearbeiten wurde das Hauptaugenmerk auf die Analyse der erbrachten physikalischen Leistungen und dem Leistungsabfall während der einzelnen Intervallbelastungen sowie über den gesamten Testverlauf bei Männern und Frauen mit gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit gelegt. Weiterhin erfolgten die Analyse der Herzfrequenz- und Blutlaktatkinetik nach wiederkehrenden hochintensiven Intervallbelastungen sowie die Überprüfung des geschlechtsspezifischen Einflusses auf den Leistungsabfall bei HIIT-Programmen mit unterschiedlichen Pausenlängen.

Die erste aufgestellte Forschungshypothese vermutete dabei, dass Frauen eine geringere relative Leistung ( $W/kg$ ) sowohl im Maximum als auch im Durchschnitt bei lokomotorischen Intervallbelastungen erreichen (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 1). Zur Prüfung der Arbeitshypothese sind die erbrachten maximalen und durchschnittlichen Leistungen für jeden einzelnen WAnT und jedes Testprotokoll (eine Minute, drei Minuten und zehn Minuten Pausenzeit) für Männer und Frauen in die Auswertung eingeflossen. Anhand der in Kapitel 5.1.1 und Kapitel 5.1.2 dargestellten Ergebnisse zeigte sich, dass die männlichen Probanden sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger aktiver Regenerationszeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen signifikant höhere Leistungen in der Spitze als auch im

Durchschnitt erzielt haben. Lediglich der Unterschied während des vierten WAnT mit 3-minütiger Pausenlänge wies in der maximalen Leistung keinen signifikanten bzw. hochsignifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen auf ( $p = 0,059$ ). Allerdings ist mit  $8,84 \pm 1,39$  vs.  $7,95 \pm 1,75$  W/kg ebenfalls ein Leistungsunterschied zwischen den männlichen und weiblichen Probanden feststellbar. Eine Relativierung der erbrachten maximalen und durchschnittlichen Leistungen auf die Magermasse führt ebenfalls zu einem signifikanten Leistungsunterschied zwischen beiden Geschlechtern. Werden die durchschnittlichen und maximalen Leistungen aller vier WAnTs eines jeden Testprotokolls gemeinsam betrachtet, so lässt sich eine identische Aussage treffen. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenzeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen ist sowohl im Maximum als auch im Durchschnitt bei den Männern eine signifikant bzw. hochsignifikant höhere relative Leistung sichtbar. Es zeigt sich weiterhin, dass die Leistungsdifferenz mit zunehmender Pausenlänge zwischen beiden Geschlechtern sowohl in der Spitze als auch im Durchschnitt zunimmt. Werden die maximalen und durchschnittlichen Leistungen bei 10-minütiger Pausenlänge beider Geschlechter mittels der Normwerttabelle von Maud & Shultz (1989) eingeordnet, so kann festgestellt werden, dass die Männer dem 70. Perzentil (maximale Leistung) und dem 60. Perzentil (durchschnittliche Leistung) zugeordnet werden können. Die Frauen können ebenfalls dem 70. Perzentil, auf Grundlage ihrer maximal erbrachten Leistung zugeteilt werden. Eine große geschlechtsspezifische Diskrepanz ist allerdings bei der durchschnittlichen Leistung wahrzunehmen. Hierbei können die Frauen, basierend auf der erbrachten durchschnittlichen Leistung nur dem 10. Perzentil zugeordnet werden.

Auch wenn die Normwerttabelle für eine einmalige Leistungserbringung während eines WAnT gilt, zeigt sich bei der durchschnittlichen Tretleistung während des 30-sekündigen All-Out-Tests ein großer Geschlechtsunterschied. Mögliche Ursachen werden im folgenden Verlauf hinreichend diskutiert.

Eine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und dem Geschlecht ist nicht feststellbar. Somit kann aufgezeigt werden, dass sich die maximale Leistung zwischen den verschiedenen Testprotokollen (eine Minute, drei Minuten und zehn Minuten Pausenlänge) in Abhängigkeit zum Geschlecht nicht unterscheidet. Allerdings ist ein Haupteffekt des Innersubjektfaktors Pausenlänge auf die maximale Leistung feststellbar. Es kann somit nachgewiesen werden, dass mit zunehmender Regenerationszeit zwischen den Intervallbelastungen die Sportler eine höhere maximale Leistung (W/kg) erbringen können. Ebenfalls ist ein Haupteffekt des Faktors Geschlecht festzustellen, was für einen Unterschied zwischen den Männern und Frauen bei der Erbringung von maximalen Leistungen bei kurzen hochintensiven Intervallbelastungen spricht.

Bei der durchschnittlichen Leistung ist dahingegen ein statistisch signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Pausenlänge und dem Geschlecht ersichtlich. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass sich die durchschnittliche Leistung

zwischen den verschiedenen Testprotokollen in Abhängigkeit zum Geschlecht signifikant unterscheidet. Wie bereits bei der maximalen Leistung festgestellt, steigt auch die durchschnittliche Leistung mit zunehmender Pausenzeit bei beiden Geschlechtern an. Diese Erkenntnisse über die geschlechtsspezifischen Leistungsunterschiede bei kurzen hochintensiven Intervallbelastungen decken sich mit den Ergebnissen verschiedener Studien. Perez-Gomez et al. (2008) konnten bei männlichen Probanden eine 22 % höhere durchschnittliche Leistung während des WAnT ermitteln. In der vorliegenden Studie lagen die geschlechtsspezifischen Leistungsunterschiede zwischen 26 % bei 1-minütiger Regenerationszeit und 30 % bei 10-minütiger Pausenlänge. Bei der maximalen Tretleistung konnten Perez-Gomez et al. (2008) allerdings keinen Unterschied zwischen Männern und Frauen ermitteln. Diese Erkenntnis konnte mit der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden. Der Leistungsunterschied betrug anhand der Ergebnisse zwischen 14 % bei 1-minütiger Pausenzeit und 16 % bei 10-minütiger Pausenlänge. Der Hauptgrund für den Geschlechtsdimorphismus bei maximaler und durchschnittlicher Leistung während des WAnT scheint die different ausgebildete Muskelmasse der unteren Extremitäten zu sein. Auf gleicher Ebene argumentieren Cheuvront et al. (2005), welche den Geschlechtsdimorphismus bei Sprint- und Distanzlaufleistungen anhand einer höheren aeroben Kapazität und Muskelkraft bei Männern erklären. Auch Esbjörnsson-Liljedahl et al. (2002) konnten in ihrer Studie an Freizeitsportlern hochsignifikante Leistungsunterschiede sowohl in der maximalen als auch in der durchschnittlichen Tretleistung während drei aufeinanderfolgender WAnTs ermitteln. Allerdings wurden diese Werte nur absolut dargestellt und nicht auf das Körpergewicht oder die Magermasse bezogen. Weiterhin war die Pausenzeit zwischen den einzelnen WAnTs mit 20 Minuten deutlich länger als in der vorliegenden Untersuchung. Dennoch konnten die Autoren ebenfalls eine um 30 % höhere maximale Leistung sowie um 28 % höhere durchschnittliche Leistung bei Männern gegenüber Frauen nachweisen. Diese Erkenntnisse bestätigen ebenfalls einen möglichen Erklärungsansatz, dass die geschlechtsspezifischen Leistungsdifferenzen bei lokomotorischen Intervallbelastungen auf die differente Verteilung der Muskelmasse und die unterschiedlichen Muskelquerschnitte in den unteren Extremitäten zurückzuführen sind, sowie hormonelle und trainingsbedingte Unterschiede in der Muskelfaserstruktur zwischen Männern und Frauen vorliegen. Mit ca. 42 % weisen Männer einen höheren Muskelanteil als Frauen mit ungefähr 36 % auf. Zudem kann der Muskelquerschnitt aufgrund eines höheren Testosterongehaltes beim Mann um 20 % größer sein, was zu einer erhöhten Kraftentwicklung führen kann. Auch die Muskelfaserstruktur und -verteilung kann eine Erklärung für die Leistungsdifferenzen bei kurzen hochintensiven Intervallbelastungen liefern. Vor allem der höhere Testosteronanteil bei Männern fördert die Muskelfaserhypertrophie, insbesondere der Typ-IIb-Fasern. Diese Muskelfasern sind bei schnellen und kraftvollen Bewegungen notwendig und entwickeln hohe Kontraktionskräfte. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, kann die aktuelle Studienlage bestätigt werden, dass ein

Geschlechtsdimorphismus bei der Erbringung von maximalen und durchschnittlichen relativen Leistungen vorliegt und es daher unabdingbar scheint geschlechtsspezifische Belastungsvorgaben für ein HIIT-Programm vorzunehmen.

Weiterhin ist aufgrund der aktuellen Studienlage vermutet worden, dass Frauen innerhalb der lokomotorischen Intervallbelastungen eine bessere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall sowie eine höhere Ermüdungsresistenz über das komplette HIIT-Programm aufweisen (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 2). Für die Überprüfung der Arbeitshypothese ist der Leistungsabfall ( $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{WAnT}}$ ) innerhalb der 30-sekündigen Ausbelastung für jeden WAnT ermittelt und für die unterschiedlichen Testprotokolle dargestellt worden. Weiterhin wurde der prozentuale Leistungsabfall zwischen dem ersten und dem vierten WAnT berechnet ( $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{HIIT}}$ ) und für die verschiedenen Testdesigns aufgeführt (Vgl. Kapitel 5.1.1 und 5.1.2).

Anhand der Ergebnisse zeigt sich deutlich, dass die weiblichen Probanden sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch bei 10-minütiger Pausenzeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen einen signifikant bzw. hochsignifikant höheren Abfall der Leistung innerhalb der jeweiligen 30-sekündigen Ausbelastungen haben und somit eine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Abfall bei maximalen Belastungen aufweisen. Die gleichen Feststellungen lassen sich, bezogen auf die unterschiedlichen Testprotokolle treffen. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenlänge fällt der  $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{WAnT}}$  innerhalb der wiederkehrenden Belastungen bei den Frauen signifikant höher aus.

Die Analyse des Interaktionseffekts Pausenlänge und Geschlecht zeigt eine statistisch signifikante Interaktion. Somit unterscheiden sich beide Geschlechter, bezogen auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall über die unterschiedlichen Testprotokolle hinweg. Weber et al. (2006) konnten in ihrer Studie zwar ebenfalls eine höhere Ermüdungsresistenz bei Männern während des WAnT auf dem Radergometer feststellen, allerdings waren die Geschlechtsunterschiede nicht signifikant. Des Weiteren fiel der Leistungsabfall innerhalb der Intervallbelastung mit 51,8 % bei den männlichen Probanden und 54,3 % bei den Frauen deutlich höher aus, als es die vorliegenden Ergebnisse zeigen. Bei Untersuchungen des gleichen Probandenkollektivs bezüglich maximaler Belastungen an einem Handkurbelergometer konnten die Wissenschaftler signifikante Leistungsunterschiede bei Männern und Frauen feststellen.

Die Berechnung des Ermüdungsindex bei der Studie von Weber et al. (2006) erfolgte auf der Basis des Verhältnisses maximaler Leistung zu minimaler Leistung. Dieser Unterschied in der Berechnungsgrundlage muss bei der Interpretation der abweichenden Ergebnisse mit einbezogen werden. Dennoch widersprechen die vorliegenden Erkenntnisse der Schlussfolgerung der Autoren, dass die Muskulatur der unteren Extremitäten keine qualitativen physiologischen Unterschiede zwischen

Frauen und Männern bei einer anaeroben Belastung aufweisen (Vgl. Weber et al., 2006). Auch Froese & Houston (1987) berichten in ihrer Studie von einem größeren Ermüdungsindex (Abfall der maximalen Leistung) bei Männern im Vergleich zu Frauen bei einem 30-sekündigen WAnT. Ein Geschlechtsdimorphismus bei anaeroben Belastungen, bezogen auf die muskuläre Ermüdung scheint daher vorhanden zu sein. Die Erklärung, dass bei Männern eine verringerte Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall allein auf der Grundlage einer höheren initialen Leistungserbringung zurückzuführen ist, kann mit den vorliegenden Ergebnissen nicht bestätigt werden. Vielmehr scheint es, dass die höhere oxidative Kapazität und eine höhere ATP-Resynthese der Männer einen positiven Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während der 30-sekündigen, maximalen Ausbelastung haben.

Weitere Erkenntnisse aus dem Review von Hicks et al. (2001) zeigen ebenfalls einen geschlechtsspezifischen Unterschied, in Form einer erhöhten Ermüdungsresistenz bei Frauen unter anderem bei submaximalen Kontraktionen des Knieextensors und des Ellenbogenflexors auf. Die Autoren hielten dabei fest, dass mit zunehmender Intensität der Kontraktion die geschlechtsspezifischen Unterschiede abnahmen sowie bei intermittierenden maximalen Kontraktionen kein Unterschied in der Ermüdung zwischen den Geschlechtern zu ermitteln war. Allerdings bezogen sich die Ergebnisse allein auf isometrische Kontraktionen und nicht auf dynamische Bewegungsmuster, wie beispielsweise Sprintbelastungen auf dem Radergometer. Weiterhin können verschiedene Aspekte aus neuromechanischer Sicht für die geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall bei Frauen während einer hochintensiven Belastung herhalten. Eine akute Ermüdung kann hierbei durch die Kombination einer verringerten Reizleitungsfähigkeit, einer reduzierten muskulären Erregbarkeit (Perrey et al., 2010) sowie Änderungen im Innervationsverhalten (Matsuura et al., 2006) und den Eigenschaften des Muskel-Sehnen-Komplexes (Morin et al., 2006) forciert werden. Dennoch bedarf es einer umfassenderen Datenlage zur Klärung des Sachverhaltes, inwiefern geschlechtsspezifische neuromuskuläre und metabolische Unterschiede das Ermüdungsmuster während Sprintbelastungen zwischen Männern und Frauen beeinflussen.

Weiterhin lässt sich bei beiden Probandengruppen bei allen drei Testprotokollen ein negativer Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Leistung und dem prozentualen Leistungsabfall<sub>WAnT</sub> ermitteln. Bei den Männern ist sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenzeit eine starke negative Korrelation feststellbar. Die weiblichen Probanden weisen bei 1-minütiger Regenerationszeit einen starken negativen Zusammenhang zwischen beiden Variablen auf, sowie eine mittlere negative Korrelation bei drei und zehn Minuten Pausenlänge. Anhand dieser Erkenntnis lässt sich schlussfolgern, dass sowohl die männlichen als auch die weiblichen Probanden, welche eine hohe durchschnittliche

Leistung erbringen können, ebenfalls eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall aufweisen. Dies lässt die Vermutung zu, dass Probanden mit einem hohen Leistungsniveau bei anaeroben Belastungen ebenfalls ermüdungsresistenter sind. Inwiefern es einen Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf die Ermüdung innerhalb einer maximalen Belastung und den Leistungsabfall über ein HIIT-Programm gibt, wird zu einem späteren Zeitpunkt noch diskutiert.

Der relative Leistungsabfall zwischen dem ersten und dem vierten WAnT des jeweiligen Testprotokolls kann ebenfalls einen Aufschluss über den Ermüdungsgrad der Probanden liefern. Grundsätzlich ist anzunehmen, je höher der Leistungsabfall während des HIIT-Programms ist, desto größer ist auch die Ermüdung des Sportlers. Anhand der unterschiedlichen Pausenlängen zwischen den Intervallbelastungen sind verschiedene Ermüdungsgrade für die Probanden provoziert worden. Eine Analyse des Interaktionseffekts zwischen Pausenlänge und Geschlecht zeigt keine statistische Signifikanz. Somit ist keine Wirkung der beiden Haupteffekte Pausenlänge und Geschlecht auf den prozentualen Leistungsabfall nachzuweisen. Allerdings ist ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Geschlecht feststellbar. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die Ermüdung während eines HIIT-Programms, ungeachtet von der Pausenlänge geschlechtsspezifisch ist. Obwohl Frauen eine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während Intervallbelastungen haben, weisen sie einen geringeren prozentualen Leistungsabfall über den Verlauf eines gesamten HIIT-Programms auf. Bei 1-minütiger und 10-minütiger Pausenlänge sind die Unterschiede beim Ermüdungsgrad verglichen mit den Männern signifikant. Bei 3-minütiger Regenerationszeit ist ebenfalls eine geschlechtsspezifische Differenz feststellbar, allerdings unterscheidet sich diese nicht statistisch ( $p = 0,08$ ). Frauen erzielen bei anscheinend ausreichend langer Pausenzeit von 10 Minuten zwischen den einzelnen Intervallen sogar eine minimale Leistungssteigerung über das HIIT-Programm hinweg. Das bestätigen auch die Ergebnisse der Studie von Esbjörnsson-Liljedahl et al. (1999), die bei Männern einen signifikanten Rückgang der Leistung über drei WAnTs mit jeweils 20 Minuten Pausenzeit feststellen konnten, bei Frauen allerdings nicht. Anhand der Erkenntnisse ist die Schlussfolgerung gezogen worden, dass Frauen besser in der Lage sind Leistungen während längerer Sprints, getrennt mit ausreichend langen Pausen aufrechtzuerhalten. Die Ergebnisse decken sich ebenfalls mit den Untersuchungen von Laurent et al. (2010). Die Autoren konnten bei wiederkehrenden hochintensiven Sprintbelastungen ebenfalls einen Einfluss des Geschlechts auf den Leistungsabfall feststellen. Die Frauen wiesen dabei einen geringeren Leistungsabfall über mehrere aufeinanderfolgende 30m-Sprints auf. Deshalb scheinen Frauen in der Lage zu sein, maximale Leistungen während eines HIIT-Programms länger auf einem höheren Niveau zu halten und sich nach maximalen Belastungen besser zu erholen.

Ein Erklärungsansatz für die Unterschiede in dem Grad der Ermüdung bei HIIT-Programmen könnte die in dem Review von Haizlip et al. (2015) postulierte geschlechtsspezifische Verteilung von FT- und ST-Fasern darstellen. Es wird dabei vermutet, dass Frauen einen höheren Anteil an langsamzuckenden Muskelfasern besitzen, welche eine höhere Ermüdungsresistenz gegenüber Belastungen aufweisen. Dahingegen scheinen Männer eher einen größeren Anteil an schnellzuckenden Muskelfasern zu haben, die eine höhere Kraftentwicklung aufweisen, allerdings auch einer deutlich schnelleren Ermüdung unterliegen. Daran ansetzend zeigen Studien, dass sich mit fortschreitender intermittierender Belastung auch das Innervationsverhältnis zwischen schnell- und langsamzuckenden Muskelfasern verändert. So konnten Billaut et al. (2006) auf eine Veränderung der Innervationsmuster durch intermittierende Belastungsprofile hinweisen. Mit zunehmender Ermüdung wird die Rekrutierung der stark belasteten schnellzuckenden Typ-II-Fasern sukzessive reduziert, womit es zu einer Verschiebung des Verhältnisses von rekrutierten Typ-II- und Typ-I-Muskelfasern kommt (Matsuura et al., 2006). Unter Berücksichtigung der höheren aeroben Kapazität der Typ-I-Muskelfasern (Hollmann et al., 2000; Marées & Heck, 2006), kann das einen Grund für den zunehmenden Anteil der aeroben Energiegewinnung bei Belastungen mit Intervallcharakter darstellen.

Weiterhin hängt der Verbrauch hochenergetischer Phosphate stark von der Muskelfaserstruktur ab. Der Verbrauch von Phosphokreatin ist in FT-Fasern gegenüber ST-Fasern deutlich erhöht (Bishop et al., 2004), was zu einer individuellen Ermüdungscharakteristik verschiedener Sportler bei gleichen Belastungsanforderungen führt. Athleten die anfänglich hohe Leistungen erbringen können, weisen einen stärkeren Leistungsabfall auf, als Sportler, denen eher eine langsamzuckende Muskelfasercharakteristik zuzuweisen ist (Karatzaferi et al., 2001). Von diesen aufgezeigten Aspekten könnten dann wiederum die Frauen, aufgrund der unterschiedlichen Verteilung von FT- und ST-Fasern hinsichtlich einer höheren Ermüdungsresistenz gegenüber intermittierenden Belastungen profitieren. Einen weiteren Erklärungsansatz könnte die Erbringung der höheren Initialleistung bei Männern liefern, die dann wiederum zu einer größeren Beteiligung der anaeroben Glykolyse und einer damit später verbundenen Hemmung der Muskelglykolyse sowie zu kontraktilen Mechanismen während nachfolgender Sprintbelastungen führt (Billaut & Bishop, 2009). Darauf stützen sich auch Erkenntnisse weiterer Studien, die besagen, dass Personen mit höherer anaerober Kapazität, welche Männer in der Regel im Vergleich zu Frauen aufweisen, eine höhere Anfangsleistung erzielen, die dann wiederum in verstärkte Leistungseinbußen bei intermittierenden Belastungen resultieren (Bishop et al., 2003; Bishop & Spencer, 2004). Weiterhin kann die bessere Ermüdungswiderstandsfähigkeit der dynamischen Muskelkraft bei Frauen möglicherweise durch einen schnelleren Laktatstoffwechsel der Frauen bedingt sein. Unterschiedliche Größenverhältnisse und Körperkompensationen zwischen Männern und Frauen können möglicherweise ein Faktor für eine geschlechtsspezifische Laktatkinetik und Ermüdungsresistenz sein. Ein kleinerer

Querschnitt der Muskelfasern bei Frauen könnte in kürzere Diffusionsstrecken zwischen Muskel und Blut münden, welche wiederum eine höhere relative Dichte von Kapillargefäßen mit sich führt (Kayar et al., 1982). Daraus kann die Vermutung aufgestellt werden, dass Frauen daher in der Lage sind eine schnellere Diffusion von O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und Stoffwechselprodukten wie Laktat und H<sup>+</sup> von der Muskulatur in das Blut während und nach intensiven Sprints zu realisieren. Inwiefern dieser Erklärungsansatz nicht nur für die erhöhte Ermüdungsresistenz von Frauen während eines HIIT-Programms dient, sondern eventuell auch einen Einfluss auf die Blutlaktatkinetik aufweist, wird in der abschließenden Betrachtung geklärt.

Die Einbeziehung der subjektiv wahrgenommenen Anstrengung (mittels RPE-Skala) sowie Regeneration (TQR-Skala) lässt erkennen, dass sich die Männer sowohl bei dem Testprotokoll mit einer Minute Pause ( $18,36 \pm 0,98$  vs.  $17,67 \pm 1,02$ ), drei Minuten Regeneration ( $18,07 \pm 0,79$  vs.  $17,38 \pm 0,87$ ) als auch zehn Minuten Pausenlänge ( $18,04 \pm 0,57$  vs.  $16,54 \pm 0,90$ ) minimal höher belastet fühlen. Die Geschlechtsunterschiede sind allerdings nicht signifikant. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Untersuchungen von Laurent et al. (2010), die ebenfalls keinen geschlechtsspezifischen Unterschied in der subjektiv wahrgenommenen Anstrengung nach intermittierenden Sprintbelastungen feststellen konnten.

Weiterhin ist ein signifikanter Haupteffekt des Innersubjektfaktors Pausenlänge nachweisbar, welches den Schluss zulässt, dass mit steigender Pausenzeit die Probanden weniger belastet werden. Das bestätigen auch die sinkenden RPE-Werte bei Männern und Frauen mit steigender Pausenlänge. Ebenfalls ist eine zunehmende subjektive Regeneration mit steigender Pausenzeit nach den Intervallbelastungen bei beiden Geschlechtern ersichtlich (1 min:  $11,19 \pm 0,80$  vs.  $10,65 \pm 0,72$ ; 3 min:  $13,04 \pm 0,83$  vs.  $13,06 \pm 0,61$ ; 10 min:  $15,37 \pm 0,30$  vs.  $14,98 \pm 0,20$ ). Ein signifikanter Geschlechtsunterschied konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Bei näherer Betrachtung der deskriptiven Daten des relativen Leistungsabfalls lässt sich erkennen, dass der Grad der Ermüdung bei den Männern im Testprotokoll mit 3-minütiger Pausenlänge eine ähnliche Ausprägung aufweist, wie der Ermüdungsgrad der weiblichen Probanden bei einer Minute Regenerationszeit ( $13,70 \pm 9,34$  vs.  $15,36 \pm 9,82$  %). Dies lässt darauf hindeuten, dass ein HIIT-Programm für Frauen mit einem Drittel der männlichen Pausenlänge ähnlich beanspruchend ist. Zu einem identischen Ergebnis kamen Schmitz et al. (2020) in ihrer Studie. Sie schlussfolgerten aus den Ergebnissen, dass für Frauen tendenziell eher ein HIIT-Programm mit kürzeren Pausenzeiten geeignet zu sein scheint, wobei bei Männern die Pausenlänge keinen positiven oder negativen Einfluss hat. Sie profitieren gleichermaßen von kurzen oder langen Regenerationsphasen. Kritisch muss allerdings erwähnt werden, dass die Differenz zwischen kurzer und langer Pausenzeit bei dieser Untersuchung das Sechsfache betrug und eine Einteilung des Probandenkollektivs auf Grundlage der Leistungsfähigkeit nicht stattgefunden hat.



Weiterhin ist bei der Betrachtung eines möglichen geschlechtsspezifischen Einflusses auf die Belastungs- und Erholungskinetik die Vermutung aufgestellt worden, dass Frauen nach lokomotorischen Intervallbelastungen eine bessere Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz im Vergleich zu Männern aufweisen (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 3). Zur Überprüfung dieser Arbeitshypothese sind die ermittelten Herzfrequenzwerte während und nach den Intervallbelastungen sowie in der abschließenden 15-minütigen Ausfahrphase zugrunde gelegt worden. Der prozentuale Abfall der Herzfrequenz über einen gewissen Zeitraum kann dabei einen Aufschluss liefern, wie schnell sich der Proband nach einer maximalen Ausbelastung erholt.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Frauen, unabhängig von dem Testprotokoll zu allen Messzeitpunkten, im Mittel eine höhere Herzfrequenz aufweisen als die Männer. Allerdings sind die Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen vor allem in den Belastungsherzfrequenzen nicht signifikant. Diese Erkenntnis bestätigt die Untersuchungsergebnisse von Hottenrott & Neumann (2012), die nur bei submaximalen Belastungen einen größeren geschlechtsspezifischen Unterschied in der Herzfrequenz feststellen konnten. Bei maximaler Ausbelastung war keine Geschlechtsdifferenz in der Herzfrequenz sichtbar. Die bei den Frauen vermutete schnellere Regeneration der Herzfrequenz nach kurzen hochintensiven Intervallbelastungen konnte in der vorliegenden Studie allerdings nicht bestätigt werden. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenlänge ist bei den männlichen Probanden sowohl zwischen den Intervallbelastungen als auch in der 15-minütigen Nachbelastungsphase ein höherer prozentualer Abfall der Herzfrequenz feststellbar. Vor allem in der Nachbelastungsphase bei den Testprotokollen mit 1-minütiger und 10-minütiger Pausenlänge waren die geschlechtsspezifischen Unterschiede signifikant.

Es zeigt sich weiterhin, dass der Geschlechtsdimorphismus im prozentualen Abfall der Herzfrequenz mit zunehmender Pausenzeit zunimmt. In der ersten Minute nach der Intervallbelastung sind die Regenerationsquoten zwischen Männern und Frauen noch nahezu identisch, ab der dritten Minute nach der Ausbelastung ist dann eine deutlichere Diskrepanz festzustellen. Auch Kappus et al. (2015) stellten sowohl eine Minute als auch zwei Minuten nach einer Ausbelastung bei Männern eine signifikant schnellere Herzfrequenzwiederherstellung im Vergleich zu Frauen fest. Diesen Geschlechtsunterschied erklärten die Autoren mit einer bei Frauen verlangsamten Erholung der sympathischen Aktivität sowie einer schnelleren Reaktivierung des Vagusnervs. Ähnliche Ergebnisse konnten De Mendonca et al. (2017) in ihren Untersuchungen ermitteln. Die Autoren stellten eine schnellere Herzfrequenzwiederherstellung bei den männlichen Probanden eine Minute ( $38,0 \pm 9,2$  vs.  $33,6 \pm 7,8$  S/min) beziehungsweise zwei Minuten ( $60,6 \pm 7,7$  vs.  $56,4 \pm 12,2$  S/min) nach einer maximalen Belastung auf dem Radergometer fest. Allerdings waren die Geschlechtsunterschiede nicht signifikant und daher schlussfolgerten die Autoren, dass die Herzfrequenzwiederherstellung nach einer Ausbelastung nicht

geschlechtsabhängig ist. Die Wissenschaftler vermuteten, dass die Herzfrequenzwiederherstellung insbesondere kurz nach Belastungsende stark vom Fitnesslevel beeinflusst zu werden scheint. Aufgrund dessen, dass die Männer und Frauen die gleiche Ausdauerleistungsfähigkeit bei der vorliegenden Studie aufwiesen und sich ebenfalls eine Minute nach dem WAnT nur geringe Geschlechtsunterschiede zeigten, kann dies einen plausiblen Erklärungsansatz darstellen.

Daraus kann geschlossen werden, dass die  $VO_{2max}$  die Herzfrequenzwiederherstellung nach einer Minute positiv beeinflusst und nicht ein möglicher Geschlechtsdimorphismus. Mit steigender Pausenzeit scheint es dann zu einer geschlechtsspezifischen Beeinflussung bei der Herzfrequenzwiederherstellung zu kommen. Dabei kann vermutet werden, dass die Unterschiede in der Regulierung des autonomen Nervensystems, in Form von der Aktivierung und Deaktivierung des Parasympathikus und Sympathikus zu finden sind (Pierpont & Voth, 2004). Frühere Studien zeigten nach maximaler Belastung, dass der Peakwert des Plasmaspiegels von Noradrenalin 108 Sekunden nach Belastungsende erreicht worden ist (Watson et al., 1980). Anschließend nimmt die Noradrenalinkonzentration exponentiell ab. Das späte Erreichen des maximalen Plasmaspiegels von Noradrenalin deutet darauf hin, dass der sympathische Antrieb noch weit bis in die erste Minute der Erholung andauern kann, was wiederum die parasympathische Aktivität hemmt und somit den Abfall der Herzfrequenz behindert. Ab der zweiten Minute der Erholung ist dann der Abfall der Noradrenalinkonzentration deutlich höher, was die parasympathische Aktivierung fördert (Borresen & Lambert, 2008). Aufgrund dieses Mechanismus scheint es, dass das Geschlecht, ab einem Zeitpunkt wo es zu einem starken Anstieg des Vagaltonus und einer Deaktivierung des Sympathikus kommt, einen Einfluss auf die Herzfrequenzwiederherstellung hat (de Mendonca et al., 2017).

Im Unterschied dazu, zeigten Arena et al. (2009) bei maximalen und supramaximalen Laufbandbelastungen bei Männern einen signifikant schnelleren Rückgang der Herzfrequenz nach einer beziehungsweise zwei Minuten nach Belastungsende. Allerdings erfolgte nur eine Betrachtung der Absolutwerte. Dennoch konnte, ähnlich wie in der vorliegenden Studie, mit fortschreitender Zeit ein größerer Unterschied in der Geschlechtsspezifität festgestellt werden. Als Erklärungsansatz für die Differenzen könnten, wie bereits von Arena et al. (2009) postuliert, die unterschiedlichen Herzfrequenzreserven dienen. Männer weisen aufgrund einer geringeren Ruheherzfrequenz verglichen mit Frauen (50 bis 70 S/min vs. 60 bis 80 S/min) somit eine höhere Herzfrequenzreserve auf, was sich wiederum positiv auf die Herzfrequenzwiederherstellung nach kurzen hochintensiven Intervallbelastungen auswirken kann.

Abschließend ist betrachtet worden, inwiefern das Geschlecht einen Einfluss auf den Blutlaktatabtransport nach lokomotorischen Intervallbelastungen hat. Dabei ist die Annahme aufgestellt worden, dass Frauen verglichen mit Männern eine höhere Laktatabbaurrate nach kurzen hochintensiven Belastungen aufweisen (Vgl. Kapitel 3,

Hypothese 4). Für die Überprüfung der Hypothese sind die Blutlaktatkonzentrationen über den gesamten Testverlauf in die Auswertung einbezogen sowie die prozentuale Laktatabbaurate in der Nachbelastungsphase berechnet worden. Somit lässt sich eine Aussage über die metabolische Belastung für beide Geschlechter treffen.

Der in Kapitel 5.1.4 dargestellte Vergleich der Nachbelastungslaktatkonzentrationen beider Geschlechter zeigt, dass die Frauen bei allen drei Testprotokollen signifikant geringere Blutlaktatkonzentrationen in der Nachbelastungsphase aufweisen sowie bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenlänge den Laktatpeak früher erreichen als die männlichen Probanden. Während sich die Nachbelastungslaktatwerte des kürzesten und des längsten Pausendesigns zu allen Zeitpunkten signifikant voneinander unterscheiden, zeigen sich diese statistischen Unterschiede bei 3-minütiger Pausenlänge nicht in der Deutlichkeit. Lediglich zu drei der fünf Messzeitpunkte unterscheiden sich die Blutlaktatkonzentrationen signifikant. Dennoch ist sowohl beim Messzeitpunkt E3 ( $15,25 \pm 3,27$  vs.  $13,22 \pm 3,78$  mmol/l,  $p = 0,055$ ) als auch E15 ( $7,93 \pm 3,22$  vs.  $6,10 \pm 3,02$  mmol/l,  $p = 0,056$ ) eine Diskrepanz zwischen beiden Probandengruppen sichtbar, nur die statistische Signifikanz kann nicht nachgewiesen werden.

Bei Betrachtung der Blutlaktatkonzentrationen während der Belastungsphase zeigen sich bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenlänge keine signifikanten Unterschiede in der Akkumulation. Die beiden Laktatkurven verlaufen nahezu kongruent. Ein deutlicher geschlechtsspezifischer Unterschied in der Laktatkinetik lässt sich bei 10-minütiger Pausenzeit feststellen. Während die Männer über den Testverlauf einen stetigen Anstieg der Laktatkonzentration aufweisen, können die Frauen in der aktiven Regenerationphase zwischen den Intervallbelastungen die Laktatakkumulation absenken.

Die geschlechtsspezifischen Unterschiede während der Pausenzeiten zwischen den Intervallen sind dabei hochsignifikant. Auch die Analyse der prozentualen Laktatabbaurate während der Nachbelastungsphase lässt erkennen, dass die Frauen bei allen drei Testprotokollen eine höhere Laktatabbaurate aufweisen als die Männer. Bei 3-minütiger und 10-minütiger Pausenlänge sind die geschlechtsspezifischen Differenzen signifikant. Auch bei kurzer Regenerationszeit weisen die Frauen einen schnelleren Abtransport des Blutlaktats auf ( $56,61 \pm 13,43$  vs.  $49,85 \pm 12,83$  %,  $p = 0,085$ ), lediglich die statistische Signifikanz ist nicht nachweisbar.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass der weibliche Organismus im Anschluss an ein HIIT-Programm die angefallenen Stoffwechselprodukte, wie beispielsweise das Laktat, in einem anderen Umfang abbaut als die Männer. Im Unterschied zu Ergebnissen anderer Studien fällt weiterhin auf, dass die weiblichen Probanden bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenlängen zwischen den Intervallbelastungen ähnlich viel Laktat akkumulieren wie die männlichen Athleten. Gegensätzlich stellten weitere Studien signifikant

geringere Laktatkonzentrationen bei Frauen fest, sowohl in der Nachbelastungs- als auch während der Belastungsphase (Deschenes et al., 2006; Gratas-Delamarche et al., 1994). Exakte wissenschaftliche Erklärungen zu den möglichen Mechanismen des schnelleren Laktatabbaus bei Frauen liegen noch nicht vollumfänglich vor. Eine Erklärung für die Unterschiede in der Blutlaktatkinetik könnte das Vorhandensein von geschlechtsspezifischen Größenverhältnissen und Körperkompensationen liefern. Die durchschnittlich kleineren Größenverhältnisse der Frauen lassen die Vermutung zu, dass der Organismus in der Lage ist eine schnellere Diffusion von  $O_2$ ,  $CO_2$  und Stoffwechselprodukten, wie Laktat und  $H^+$  von der Muskulatur in das Blut während und nach intensiven Sprints zu realisieren. Darüber hinaus führt die geringere Körpergröße eventuell zu kürzeren kardiovaskulären Kreislaufzeiten, was wiederum ein früheres Auftreten der maximalen Blutlaktatkonzentration nach intensiven Sprints begünstigt, wie es in der vorliegenden Studie bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenlänge aufgezeigt werden konnte. Die geringere relative Muskelmasse und der größere relative Laktatverteilungsraum, wie er bereits bei Kindern festgestellt werden konnte (Beneke et al., 2005), kann ebenfalls zudem eine schnellere Diffusion des Laktats ermöglichen.

Ein weiterer möglicher Erklärungsansatz für eine höhere Laktatabbaurate bei Frauen nach einem HIIT-Programm könnten Unterschiede in der metabolischen und hormonellen Reaktion sein. Das Stoffwechselprodukt Laktat, welches in Folge einer hohen Belastung exponentiell akkumuliert wird, muss anschließend vom Organismus abtransportiert werden. Ungefähr drei Viertel des Laktats werden zur Energiebereitstellung in Herz, Leber und Niere oxidiert. Das restliche Laktat kann in der Leber und Niere zur Gluconeogenese genutzt werden. Daher ist zu vermuten, dass es geschlechtsspezifische Unterschiede in diesen Prozessen gibt. Eine dabei typische Reaktion auf intensive Belastungen in metabolischer und hormoneller Hinsicht ist ein starker Abfall des hohen Katecholaminspiegels sowie ein Anstieg des Insulins (Tomasits & Haber, 2016). In einer früheren Untersuchung von Gratas-Delamarche et al. (1994) konnte im Anschluss an eine supramaximale Belastung ein signifikant höherer Katecholaminspiegel bei Männern als bei Frauen festgestellt werden. Darüber hinaus weisen Vincent et al. (2004) einen signifikant höheren Insulinspiegel bei Frauen im Anschluss an hochintensive Belastungen nach. Ausgehend von diesen Erkenntnissen könnte vermutet werden, dass die männlichen Sportler im Anschluss an die Belastung auf hormoneller Ebene noch länger im Leistungsmodus verbleiben, wobei die Frauen schneller auf den Regenerationszustand umstellen. Somit könnte auch die früher und erst im Anschluss einsetzende Gluconeogenese mit eher abfallenden Laktatkonzentrationen erklärt werden. Diese Vermutung bedarf allerdings einer weiteren Abklärung.

Die Annahme unterstützen ebenfalls die Ergebnisse der Studie von Lievens et al. (2020) sowie die Erkenntnisse aus dem Review von Haizlip et al. (2015). Lievens et al. (2020) untersuchten die verschiedenen Reaktionen auf ein hochintensives Intervalltraining, ebenfalls in Form von WAnTs, zwischen einer Gruppe mit einem

überwiegenden Anteil an langsamzuckenden Muskelfasern sowie einer weiteren Gruppe mit einem überwiegenden Anteil an schnellzuckenden Muskelfasern. Die Anteile der Muskelfasertypen der Wadenmuskulatur wurden in der Untersuchung mittels Magnetresonanzspektroskopie festgestellt. Die „slow twitch“-Gruppe regenerierte deutlich schneller als die „fast twitch“-Gruppe. Die schneller regenerierende Gruppe erlangte ihre Kraftfähigkeit innerhalb von etwa 20 Minuten zurück, wobei die Gruppe mit verzögerter Regeneration für dieselben Werte fast fünf Stunden benötigte. Unter Einbezug des Reviews von Haizlip et al. (2015), die von einer genetischen Verteilung der langsam- und schnellzuckenden Muskelfasern mit einem höheren Anteil an „slow twitch“-Fasern bei Frauen und einem höheren Anteil an „fast twitch“-Fasern bei den Männern ausgehen, stehen die Ergebnisse von Lievens et al. (2020) mit den Erkenntnissen der vorliegenden Studie in Übereinkunft. Das Regenerationsmuster der Frauen stimmt auch im Hinblick auf die erhobenen Laktatwerte in weiten Teilen mit dem der „slow twitch“-Gruppe überein, das der Männer dementsprechend mit der „fast-twitch“-Gruppe. Sowohl der differente Laktatabbau als auch die unterschiedliche Wiederherstellung der Herzfrequenz nach HIIT-Programmen zwischen Frauen und Männern weist auf geschlechtsspezifische Regenerationsmuster hin. Insbesondere auf das Trainingspensum von Leistungssportlern bezogen, die teils mehrere Trainingseinheiten pro Tag absolvieren, sollten diese Unterschiede in der Belastungs- und Regenerationsteuerung beachtet werden. Ausgehend von unterschiedlichen metabolischen Abläufen sollte auch der Gestaltung der unmittelbaren Regenerationszeit innerhalb eines HIIT-Programmes eine hohe Aufmerksamkeit zukommen. Hierzu zählen vor allem die Beachtung des Verhältnisses von Belastung und Entlastung sowie der Einsatz von passiven oder aktiven Regenerationsphasen.

### *Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf die Belastungs- und Erholungskinetik*

Um eine valide Bearbeitung der aufgestellten Forschungsfragen in Bezug auf die Ausdauerleistungsfähigkeit sicherstellen zu können, wurde, wie bereits in der Ergebnisdarstellung aufgezeigt (Vgl. Kapitel 5.2) das Probandenkollektiv hinsichtlich des Leistungsniveaus mittels KUADC-Perzentils in eine sehr gut ausdauertrainierte Gruppe (Perzentil Ü95 –  $97,96 \pm 1,15$ ) und eine gut ausdauertrainierte Gruppe (Perzentil U80 –  $72,04 \pm 14,96$ ) klassifiziert. Eine signifikante Unterscheidung in der Geschlechterverteilung, dem Alter, dem Körpergewicht sowie dem Trainingspensum pro Woche liegt hierbei nicht vor. Auf dieser Grundlage ist davon auszugehen, dass die im fünften Kapitel aufgeführten Ergebnisse anhand zweier Probandengruppen entstanden sind, welche grundlegend in der Ausdauerleistungsfähigkeit, aber nicht in anderen möglichen leistungsvariierenden Faktoren differieren.

Das zweite Hauptziel der vorliegenden Studie beinhaltete die Überprüfung, inwiefern das Maß der Ausdauerleistungsfähigkeit einen Einfluss auf die Belastungs- und die

Erholungskinetik nach lokomotorischen Intervallbelastungen aufweist. Um diese Zielstellung zu bearbeiten wurde auch hier das Hauptaugenmerk auf die Analyse der erbrachten physikalischen Leistungen und dem Leistungsabfall während der einzelnen Intervallbelastungen sowie über den gesamten Testverlauf bei sehr gut ausdauertrainierten Sportlern und gut ausdauertrainierten Athleten gelegt. Weiterhin erfolgten die Analyse der Herzfrequenz- und Blutlaktatkinetik nach wiederkehrenden hochintensiven Intervallbelastungen sowie die Überprüfung des Einflusses der Ausdauerleistungsfähigkeit auf den Leistungsabfall bei HIIT-Programmen mit unterschiedlichen Pausenlängen.

Die erste aufgestellte Forschungshypothese vermutete dabei, dass Sportler mit einer sehr guten Ausdauer signifikant höhere relative Leistungen (W/kg) sowohl im Maximum als auch im Durchschnitt bei lokomotorischen Intervallbelastungen erbringen können (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 5). Zur Prüfung der Arbeitshypothese sind die erbrachten maximalen und durchschnittlichen Leistungen für jeden einzelnen WAnT und die unterschiedlichen Testprotokolle (eine Minute, drei Minuten und zehn Minuten Pausenzeit) beider Probandengruppen in die Auswertung eingeflossen. Anhand der in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 dargestellten Ergebnisse zeigt sich, dass die Sportler mit einer sehr guten Ausdauerleistungsfähigkeit sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger aktiver Regenerationszeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen signifikant höhere Leistungen sowohl in der Spitze als auch im Durchschnitt erzielt haben, verglichen mit den gut ausdauertrainierten Sportlern. Einzig der Leistungsunterschied während des ersten WAnT bei 1-minütiger Pausenlänge weist in der maximalen Leistung keinen signifikanten bzw. hochsignifikanten Unterschied zwischen beide Probandengruppen auf ( $p = 0,12$ ). Dennoch ist mit  $10,76 \pm 2,38$  vs.  $9,55 \pm 1,66$  W/kg eine Leistungsdiskrepanz ersichtlich.

Werden die durchschnittlichen und maximalen Leistungen aller vier WAnTs eines jeden Testprotokolls gemeinsam betrachtet, so kann eine identische Aussage getroffen werden. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenzeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen ist sowohl in der Spitze als auch im Durchschnitt bei den sehr gut Ausdauertrainierten eine signifikant bzw. hochsignifikant höhere relative Leistung sichtbar. Weiterhin zeigt sich, dass bei der durchschnittlichen Leistung der Unterschied zwischen beiden Probandengruppen mit steigender Pausenlänge zunimmt. Bei der maximalen Leistung ist dies so nicht feststellbar.

Eine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Pausenlänge und der Ausdauerleistungsfähigkeit konnte nicht festgestellt werden. Somit zeigt sich, dass sich die maximale Leistung in Abhängigkeit zu den verschiedenen Testprotokollen und der Ausdauerleistungsfähigkeit nicht unterscheidet. Allerdings ist ein Haupteffekt des Innersubjektfaktors Pausenlänge auf die maximale Leistung feststellbar (1-minütiges vs. 3-minütiges Testprotokoll sowie 1-minütiges vs. 10-minütiges Testprotokoll). Anhand dessen lässt sich festhalten, dass zwischen 1-minütiger und

10-minütiger sowie 1-minütiger und 3-minütiger Regenerationszeit Leistungsunterschiede bei der maximalen Leistung (W/kg) auftreten. Zwischen 3-minütiger und 10-minütiger Pausenlänge ist das so nicht feststellbar. Daher lässt diese Erkenntnis die Vermutung zu, dass eine Trainingsgruppe mit einem heterogenen Leistungsstand ein HIIT-Programm eher mit mittleren oder langen Pausenzeiten zwischen den Intervallen absolvieren sollte.

Ebenfalls ist ein Haupteffekt des Faktors Ausdauerleistungsfähigkeit nachweisbar, was für einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen bei der Erbringung von maximaler Leistung bei kurzen hochintensiven Intervallbelastungen spricht. Bei der durchschnittlichen Leistung ist ebenfalls kein Interaktionseffekt zwischen der Pausenlänge und der Ausdauerleistungsfähigkeit ersichtlich. Somit konnte auch hier festgestellt werden, dass sich die durchschnittliche Leistung in Abhängigkeit von Pausenlänge und Ausdauerleistungsfähigkeit nicht statistisch unterscheidet. Ein Haupteffekt des Faktors Ausdauerleistungsfähigkeit ist nachweisbar gewesen, was auf einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Probandengruppen bei der durchschnittlichen Leistung während kurzer hochintensiver Intervallbelastungen hinweist.

Die aufgezeigten Ergebnisse können mittels der allgemeinen Studienlage bestätigt werden. Bassett et al. (1991) konnten ebenfalls bei Sportlern mit einer besseren Ausdauerleistungsfähigkeit signifikant höhere Leistungen über einen 3-minütigen Radergometerstest feststellen. Der Leistungsunterschied zwischen beiden Probandengruppen betrug im Durchschnitt ca. 30 % und stimmt nahezu mit den in dieser Untersuchung ermittelten Ergebnissen überein. Auch Trapp et al. (2007) konnten anhand von weiblichen Probanden sowohl bei kurzen als auch langen Intervallbelastungen bei Trainierten eine signifikant höhere durchschnittliche Leistung ermitteln. Die Leistungsdifferenz zwischen beiden Probandengruppen fiel im Durchschnitt mit rund 38 % höher aus als in der vorliegenden Studie. Aufgrund dessen, dass die Gruppe der gut ausdauertrainierten Probanden ein höheres Ausdauerlevel aufwies, als die Gruppe der Untrainierten in der Studie von Trapp et al. (2007), lässt sich diese Differenz in der durchschnittlichen Leistung möglicherweise erklären. Die signifikant höheren Leistungen der sehr gut ausdauertrainierten Sportler lassen sich mit einer Muskelhypertrophie und einem erhöhten Muskelwachstum durch ein vermehrtes aerobes Ausdauertraining begründen (Harber et al., 2009). Weiterhin kommt es bei hochtrainierten Sportlern zu größeren neuronalen Anpassungen in der Skelettmuskulatur, wodurch sie in der Lage sind eine höhere Muskelkoaktivierung, eine höhere Muskelsteifigkeit sowie eine stärkere exzentrische und konzentrische Muskelaktivität zu erbringen (Heise et al., 2008).

Des Weiteren ist im Vorfeld die Forschungshypothese aufgestellt worden, dass eine größere Ausdauerleistungsfähigkeit auch zu einer besseren Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingtem Leistungsabfall bei lokomotorischen Intervallbelastungen sowie zu einer erhöhten Ermüdungsresistenz über den Verlauf

eines HIIT-Programms führt (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 6). Zur Überprüfung der Arbeitshypothese sind der prozentuale Leistungsabfall für jeden einzelnen WAnT ( $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{WAnT}}$ ) sowie für die unterschiedlichen Testprotokolle ermittelt worden. Weiterhin wurde der  $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{HIIT}}$  zwischen der ersten und vierten 30-sekündigen Ausbelastung berechnet und für die verschiedenen Testdesigns aufgeführt (Vgl. Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2).

Anhand der Ergebnisse zeigt sich bei der Gruppe der sehr gut ausdauertrainierten Sportler sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch bei 10-minütiger Pausenzeit zwischen den einzelnen Intervallbelastungen ein signifikant bzw. hochsignifikant geringerer Abfall der Leistung innerhalb des jeweiligen WAnT und somit eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall bei maximalen Belastungen. Eine gleiche Feststellung lässt sich, bezogen auf die unterschiedlichen Testprotokolle treffen. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenlänge fällt der  $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{WAnT}}$  innerhalb der wiederkehrenden Belastungen bei sehr gut Ausdauertrainierten signifikant geringer aus.

Eine Interaktion zwischen der Pausenlänge und der Ausdauerleistungsfähigkeit ist allerdings nicht feststellbar. Auch ein Haupteffekt des Innersubjektfaktors Pausenlänge ist nicht zu ermitteln. Somit zeigt sich, dass die Länge der Regenerationszeit zwischen den Intervallen keinen Einfluss auf die Ermüdung hat. Wie allerdings bereits dargestellt, hat die Ausdauerleistungsfähigkeit durchaus einen Effekt auf die Ermüdungswiderstandsfähigkeit innerhalb einer Intervallbelastung. Auf Grundlage der Ergebnisse wirkt sich eine sehr gute Ausdauerleistungsfähigkeit im Vergleich zu einem guten Niveau positiv auf den ermüdungsbedingten Leistungsabfall bei anaeroben Belastungen auf und bestätigt die vorangegangene Vermutung.

Als Erklärungsansatz dafür können neuronale Anpassungen in der Skelettmuskulatur, in Form von einer stärkeren Variation in den Muskelrekrutierungsmustern durch vermehrtes Ausdauertraining dienen (Chapman et al., 2008). Des Weiteren kann es durch die Fähigkeit der Erbringung einer höheren Muskelkoaktivierung, einer höheren Muskelsteifigkeit sowie einer höheren exzentrischen und konzentrischen Muskelaktivität bei hochtrainierten Sportlern auch zu einer effizienteren Nutzung der gespeicherten Energien kommen, was wiederum die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfalls positiv beeinflussen kann (Heise et al., 2008). Als weiteren Erklärungsansatz kann die Tatsache dienen, dass bei kurzen hochintensiven Belastungen die Energiegewinnung hauptsächlich aus den intramuskulären ATP- und Phosphokreatinspeichern sowie aus der anaeroben Glykolyse erfolgt (Weyand et al., 1999). Dennoch stellt auch der aerobe Metabolismus einen Anteil an der Energiebereitstellung dar (McGawley & Bishop, 2006), welcher bei Intervallbelastungen und in Abhängigkeit von Belastungslänge und Pausenzeit



weiter an Bedeutung gewinnt. Daher weisen Sportler mit einer höheren aeroben Kapazität (Bishop & Edge, 2006; Jones et al., 2013) oder einer überdurchschnittlich schnell anlaufenden Sauerstoffaufnahme signifikant bessere intermittierende Leistungen auf, als Sportler mit einer durchschnittlichen Ausprägung dieser Stoffwechselfunktionen.

Inwiefern sich der Grad der Ermüdung über ein komplettes HIIT-Trainingsprogramm im Vergleich zu beiden Probandengruppen verhält, ist anhand des prozentualen Leistungsabfalls zwischen dem ersten und vierten WAnT aufgezeigt worden ( $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{HIIT}}$ ).

Eine Analyse des Interaktionseffekts Pausenlänge und Ausdauerleistungsfähigkeit zeigt keine statistische Signifikanz. Somit ist keine Wirkung der beiden Haupteffekte auf den prozentualen Leistungsabfall über das komplette Programm nachweisbar. Lediglich ein signifikanter Haupteffekt Pausenlänge ist zu ermitteln. Somit zeigt sich, dass mit zunehmender Pausenlänge der Grad der Ermüdung abnimmt. Da kein signifikanter Haupteffekt der Ausdauerleistungsfähigkeit auftrat, ist kein Unterschied zwischen beiden Probandengruppen nachweisbar. Ob der Sportler eine sehr gute oder gute Ausdauerleistungsfähigkeit besitzt hat keinen positiven oder negativen Einfluss auf den Leistungsabfall respektive den Ermüdungsgrad während eines HIIT-Programms. Bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenlänge ist der Ermüdungsgrad der sehr gut trainierten Sportler über den Testverlauf geringer. Bei einer 10-minütigen Pausenzeit zwischen den Intervallen weisen dahingegen die gut trainierten Athleten einen geringeren Leistungsabfall auf.

Diese Ergebnisse stehen mit bisherigen Erkenntnissen anderer Studien in Konflikt. Hamilton et al. (1991) untersuchten anhand von Ausdauersportlern und Spportsportlern den Abfall der mittleren Leistung bei intermittierenden Belastungen auf dem Laufband. Über den Testverlauf stellten sie einen signifikant höheren Leistungsabfall bei Sportlern aus Spportsportarten fest ( $29,3 \pm 8,1$  vs.  $14,2 \pm 11,1$  %). Den höheren Leistungsabfall der Spportsportler erklärten sich die Wissenschaftler mit einer höheren glykolytischen Rate, welche wiederum mit einer höheren Blutlaktatkonzentration und einer geringeren Sauerstoffaufnahme zusammenhängt. Inwiefern dieser Erklärungsansatz einen Einfluss auf die Blutlaktatkinetik bei dem Vergleich zwischen sehr guter und guter Ausdauerleistungsfähigkeit hat, wird im weiteren Verlauf noch näher erörtert.

In Bezug auf den Ermüdungsgrad im Verlauf eines HIIT-Programms lässt sich verglichen mit den Ergebnissen von Hamilton et al. (1991) Folgendes feststellen. Innerhalb des Probandenkollektivs kommt es in der vorliegenden Studie zwischen beiden Gruppen zu einer größeren Differenzierung in der Ausdauerleistungsfähigkeit ( $\text{VO}_{2\text{max}}$   $57,50 \pm 5,20$  vs.  $42,21 \pm 4,79$  ml/min/kg) im Vergleich zu der Untersuchung von Hamilton et al. (Aydauersportler:  $\text{VO}_{2\text{max}}$   $60,8 \pm 4,1$  ml/min/kg vs. Spportsportler:  $\text{VO}_{2\text{max}}$   $52,5 \pm 4,9$  ml/min/kg). Dennoch ist der Unterschied im Leistungsabfall über den Testverlauf, bei vergleichbarem Belastungs-Entlastungs-Verhältnis mit der Gruppe der Aydausportler, aus der Untersuchung von Hamilton et al.

gleichzusetzen. In der vorliegenden Studie konnte, bei 3-minütiger Pausenlänge zwischen den Intervallen, ein prozentualer Leistungsabfall der sehr guten Ausdauerathleten von  $12,17 \pm 7,80$  % und der gut ausdauertrainierten Sportler von  $14,19 \pm 11,55$  % ermittelt werden. Das lässt die Vermutung zu, dass ein deutlich höheres Niveau der Ausdauerleistungsfähigkeit nicht zwangsläufig zu einem geringeren Ermüdungsgrad bei intermittierenden, hochintensiven Belastungen führt.

Mögliche Erklärungsansätze dafür, dass keine Unterschiede im Leistungsabfall innerhalb des HIIT-Programms nachweisbar sind, können folgende Aspekte liefern. Zum einen führt ein vermehrtes Ausdauertraining zu einer Vergrößerung der Mitochondrien um das Zwei- bis Dreifache, was mit einer erhöhten Leistungsfähigkeit der Muskelzelle einhergeht (Astrand, 1993). Zum anderen kommt es ebenfalls durch vermehrtes Ausdauertraining zu einer Abnahme der Enzyme zur schnellen Energiegewinnung (glykolytische Enzyme und Kreatinkinase) bei hochintensiven Belastungen (Henriksson, 1993). Anhand dessen kann die Vermutung aufgestellt werden, dass sich der Einfluss dieser beiden Anpassungseffekte eines erhöhten Ausdauertrainings, verglichen zwischen Hochtrainierten und gut Trainierten gegenseitig aufheben und somit zu einem ähnlichen Leistungsabfall und damit Ermüdungsgrad während eines HIIT-Programms führen. Gleichzeitig zeigt sich auch, dass bei ausreichend langer Pausenlänge der Unterschied in der Ausdauerleistungsfähigkeit keinen Einfluss auf die Ermüdung hat. Die Probandengruppe der gut ausdauertrainierten Sportler ist bei 10-minütiger Regenerationszeit sogar weniger beansprucht als die hochtrainierten Probanden. Allerdings kann auch die deutlich höhere Leistungserbringung der sehr gut ausdauertrainierten Sportler innerhalb der Sprintbelastungen einen Einfluss darauf haben, dass keine Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen im Leistungsabfall über das HIIT-Programm vorliegen.

Weiterhin ist die Annahme aufgestellt worden, dass sehr gut Ausdauertrainierte eine bessere Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz als gut ausdauertrainierte Sportler nach lokomotorischen Intervallbelastungen aufweisen (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 7). Zur Überprüfung dieser Arbeitshypothese sind sowohl die mittleren Herzfrequenzwerte während als auch nach den Intervallbelastungen sowie in der abschließenden 15-minütigen Nachbelastungsphase zugrunde gelegt worden. Die Herzfrequenzwiederherstellung, in Form des prozentualen Abfalls sollte somit einen Aufschluss über die Geschwindigkeit der Regeneration des Herz-Kreislauf-Systems nach maximalen Ausbelastungen liefern.

Grundsätzlich lassen sich unabhängig von der Pausenlänge bei den sehr gut ausdauertrainierten Sportlern im Mittel höhere Belastungs- und geringere Pausenherzfrequenzen sowie geringere Herzfrequenzen in der Nachbelastungsphase feststellen. Die Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen sind allerdings zu keinem Zeitpunkt signifikant.

Dennoch deckt sich diese Erkenntnis mit den Untersuchungsergebnissen von

Silverman & Mazzeo (1996), die höhere maximale Herzfrequenzen bei gut trainierten Sportlern nach einem Ausbelastungstest nachweisen konnten. Ähnliche Erkenntnisse lieferten Short & Sedlock (1997) in ihrer Untersuchung, die nach standardisierten Belastungen auf dem Radergometer geringere Erholungsherzfrequenzen bei gut Trainierten feststellten. Weiterhin fanden Silverman & Mazzeo (1996) bei den trainierten Sportlern eine höhere Adrenalin- und Noradrenalin-Konzentration bei Ausbelastungen im Vergleich zu Untrainierten. Auf Grundlage dessen lassen sich die höheren Belastungsherzfrequenzen der sehr gut Ausdauertrainierten erklären. Ebenfalls lassen die Erkenntnisse vorerst auf eine schnellere Herzfrequenzwiederherstellung nach kurzen, hochintensiven Belastungen bei besser Ausdauertrainierten hindeuten.

Werden im Folgenden die Werte des prozentualen Abfalls der Herzfrequenz nach dem Intervall sowie in der Nachbelastungsphase mit einbezogen, so lässt sich diese Vermutung bestätigen. Unabhängig von der Pausenlänge ist der prozentuale Abfall der Herzfrequenz bei den sehr gut Ausdauertrainierten zu allen Messzeitpunkten ausnahmslos höher. Allerdings sind lediglich bei 1-minütiger Pausenzeit die Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen signifikant. Die Testprotokolle mit 3-minütiger und 10-minütiger Regenerationszeit zwischen den Intervallen lassen ebenfalls Unterschiede in der Herzfrequenzwiederherstellung erkennen, allerdings sind diese während der mehrheitlichen Messzeitpunkte nicht signifikant. Vor allem in der 15-minütigen Nachbelastungsphase sind unabhängig von der Pausenlänge große Diskrepanzen in der Herzfrequenzwiederherstellung sichtbar, die bei allen drei Testprotokollen spätestens zum Messzeitpunkt E12 signifikant werden.

Es scheint so, dass vor allem bei intensiven Intervallbelastungen mit kurzen Pausenzeiten, der Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf die Wiederherstellung der Herzfrequenz besonders groß ist. Nach submaximalen Belastungen zeigten Trevizani et al. (2012) ebenfalls, dass Probanden mit einer besseren aeroben Fitness eine schnellere Herzfrequenzwiederherstellung aufweisen. Zu einem gleichen Ergebnis kamen Du et al. (2005) mit ihrer Untersuchung, die nach einem Ausbelastungstest auf dem Laufband bei Marathonläuferinnen im Vergleich zu untrainierten Frauen eine signifikant schnellere Erholung der Herzfrequenz nachwies. Die schnellere Herzfrequenzwiederherstellung nach einer Ausbelastung führten die Autoren auf eine höhere Herzfrequenzvariabilität, eine höhere aerobe Kapazität, sowie eine stärkere Blutdruckreaktion infolge der intensiven Belastung bei Ausdauertrainierten zurück. Auch Darr et al. (1988) konnten bei gut ausdauertrainierten Sportlern eine signifikant schnellere Erholung der Herzfrequenz nach einer intensiven Belastung gegenüber untrainierten Personen feststellen. Die Unterschiede waren dabei zwischen beiden Probandengruppen in der ersten Phase (15 bis 120 s nach Abbruch der Belastung) besonders deutlich. Zusätzlich gaben die Wissenschaftler an, dass die Herzfrequenzwiederherstellung bei den Trainierten im Mittel um 6 Schläge schneller erfolgte als bei den Untrainierten. Ähnliche Größenordnungen konnten durch die vorliegenden Ergebnisse nachgewiesen werden.

Auf der Grundlage weiterer Studien scheint ein Training und eine damit verbundene bessere Ausdauerleistungsfähigkeit zu einem veränderten Gleichgewicht zwischen sympathischen und parasympathischen Einflüssen auf die Herzfrequenz zu führen (Blomqvist & Saltin, 1983; Scheuer & Tipton, 1977). Als Erklärungsansatz für die Unterschiede in der Herzfrequenzwiederherstellung könnte weiterhin eine schnellere Regulierung des Nachbelastungsstoffwechsels bei besser ausdauertrainierten Sportlern dienen sowie eine Beeinflussung der Nachbelastungs Herzfrequenz durch eine Veränderung der neuronalen und intrinsischen Kontrolle mittels größerer Ausdauerleistungsfähigkeit. Durch eine verbesserte Ausdauerleistungsfähigkeit kommt es zu einer verbesserten neuro-endokrinen Reaktion auf maximale Belastungen. Dies führt, durch den Belastungsreiz, zu einer vermehrten Ausschüttung von Katecholaminen, die dann wiederum eine Steigerung der Kapazität in den Transportsystemen, wie der Ventilation und des Herz-Kreislauf-Systems nach sich zieht. Bei gut Ausdauertrainierten kommt es daher während einer Ausbelastung, wie bereits anhand der Ergebnisse von Silverman & Mazzeo (1996) dargestellt zu höheren Adrenalin- und Noradrenalinkonzentrationen im Vergleich zu Untrainierten. Auf dieser Grundlage lässt es die Vermutung zu, dass der Unterschied in der Herzfrequenzwiederherstellung eventuell mit einem schnelleren Abfall der Noradrenalinkonzentration und einer damit schnelleren Aktivierung des Parasympathikus bei höherer Ausdauerleistungsfähigkeit zu erklären ist.

Inwiefern sich die gefundenen Unterschiede in der Herzfrequenzwiederherstellung auch bei den Blutlaktatkonzentrationen nach Intervallbelastungen und in der Laktatabbaurrate der Nachbelastungsphase widerspiegeln, ist mit der achten Arbeitshypothese überprüft worden (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 8). Dabei erfolgte eine Einbeziehung der Blutlaktatkonzentrationen über den gesamten Testverlauf sowie die Berechnung der prozentualen Laktatabbaurrate in der Nachbelastungsphase, um somit eine Annahme über die metabolische Belastung beider Probandengruppen treffen zu können.

Die in Kapitel 5.2.4 dargestellten Laktatkonzentrationen nach den einzelnen WAnTs und der Nachbelastungsphase zeigen, unabhängig von dem Testprotokoll keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen. Lediglich die Ruhelaktatwerte vor dem 1-minütigen und 3-minütigen Testdesign unterscheiden sich statistisch voneinander. In der Belastungsphase, die durch die vier aufeinanderfolgenden Intervallbelastungen gekennzeichnet ist, konnte bei sehr gut und gut Ausdauertrainierten ein nahezu identischer Laktatanstieg festgestellt werden. Beide Probandengruppen erreichen unabhängig von dem Testprotokoll zum selben Messzeitpunkt (nach dem vierten WAnT) den Laktatpeak. Eventuell hängt die höhere Leistungserbringung der sehr gut Ausdauertrainierten damit zusammen, dass kein Unterschied in der maximalen Laktatkonzentration zwischen beiden Probandengruppen nachweisbar ist. Hinsichtlich diverser Studien haben die Autoren darauf hingewiesen, dass trainierte Personen bei gleicher absoluter Belastung unter anderem geringere Laktatkonzentrationen aufweisen als Untrainierte. Dies ist nicht

nur auf eine geringere Laktatproduktion zurückzuführen, sondern auch auf eine verbesserte Ausprägung der Laktatshuttlekapazität sowie eine verbesserte Verstoffwechslung des anfallenden Laktats (Lupa et al., 1994; Boutellier, 2006). Lediglich in der 15-minütigen Nachbelastungsphase fallen die Blutlaktatkonzentrationen bei den sehr gut ausdauertrainierten Sportlern geringfügig schneller ab als bei den gut Ausdauertrainierten. Ein statistischer Unterschied lässt sich allerdings nicht feststellen.

Zur näheren Beurteilung wird die prozentuale Laktatabbaurrate der Nachbelastungsphase einbezogen. Auch bei dieser Betrachtung zeigt sich zwar sowohl bei 1-minütiger ( $56,29 \pm 14,91$  vs.  $50,75 \pm 12,55$  %), 3-minütiger ( $56,80 \pm 13,86$  vs.  $48,60 \pm 9,86$  %), als auch 10-minütiger Pausenlänge ( $54,88 \pm 14,57$  vs.  $49,69 \pm 10,51$  %) eine höhere prozentuale Laktatabbaurrate bei einer besseren Ausdauerleistungsfähigkeit, allerdings sind auch diese Differenzen nicht signifikant. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Laktatabbaurrate nicht von der Länge der Pause und somit von dem Ermüdungsgrad des Probandens abhängig ist. Über die unterschiedlichen Testprotokolle sind die prozentualen Laktatabbauraten bei beiden Probandengruppen nahezu identisch. Die geringfügig höhere Laktatabbaurrate der sehr gut Ausdauertrainierten kann mit der höheren maximalen Sauerstoffaufnahme im Vergleich zu den gut trainierten Sportlern zusammenhängen. Eine hohe  $VO_{2max}$  geht ebenfalls mit einer überdurchschnittlichen MCT-Dichte einher (Thomas et al., 2005). Von den beiden in Kapitel 2.1.1 beschriebenen MCT-Isoformen MCT1 und MCT4 scheint vor allem MCT1 ein erhöhtes Adaptationspotential auf verschiedene Trainingsreize zu besitzen (Juel et al., 2004). Eine besondere Bedeutung weisen dabei die in den Erythrozyten befindlichen MCTs auf, da die erhöhte MCT-Dichte in diesem Fall mit einer erhöhten Transportkapazität und einem erhöhten Laktatausstrom aus der arbeitenden Muskulatur zusammenhängt (Juel et al., 2003). Daher können diese Erkenntnisse zur Erklärung der geringfügig höheren Laktatabbaurrate der sehr gut Ausdauertrainierten mit einbezogen werden, da trainierte Personen im Vergleich zu Untrainierten bei gleicher absoluter Belastung eine verbesserte Laktatshuttlekapazität sowie Verstoffwechslung des anfallenden Laktats aufweisen (Lupa et al., 1994; Boutellier, 2006). Bei dem untersuchten Probandenkollektiv handelt es sich um keinen Vergleich zwischen Trainierten und Untrainierten, was als mögliche Begründung dienen kann, dass keine signifikanten Unterschiede in der Laktatabbaurrate ermittelt werden konnten.

Einige Studien haben hinsichtlich der vorliegenden Ergebnisse widersprüchliche Erkenntnisse bezüglich der Laktatkinetik nach Belastungen nachweisen können. Kirsch (1994) und Schek (1997) nahmen in ihren Veröffentlichungen einen Einfluss des Ausdauertrainingszustandes auf die Laktat- und Oxidationskapazität, mit einer schnelleren Reduzierung der Laktatkonzentration bei ausdauertrainierten Sportlern an. Weiterhin postulierten die Wissenschaftler eine geringere Laktatbildung bei Ausdauersportlern, durch eine Steigerung des oxidativen Systems. Allerdings sind diese Aussagen eher auf Dauerleistungen und nicht auf kurze, hochintensive

Intervallbelastungen bezogen worden. Bassett et al. (1991) konnten bei einer Untersuchung anhand eines 3-minütigen Radergometertests bei den Ausdauertrainierten ein signifikant früheres Erreichen des Laktatmaximums ( $2,8 \pm 0,4$  Minuten nach Belastungsende) verglichen mit Untrainierten ( $3,8 \pm 0,4$  Minuten nach Belastungsende) feststellen. Daraus schlussfolgerten die Autoren, dass bei höherer Ausdauerleistungsfähigkeit das Laktat schneller in das Blut abfließt. Ein früheres Erreichen des Laktatmaximums bei höherer Ausdauerleistungsfähigkeit konnte, wie bereits aufgeführt, in der vorliegenden Untersuchung nicht gezeigt werden. Als Ansatzpunkt kann hier ebenfalls dienen, dass es sich in der vorliegenden Studie um keinen Vergleich zwischen Trainierten und Untrainierten handelt. Weiterhin konnten die Wissenschaftler in gleicher Weise keinen Unterschied zwischen Trainierten und Untrainierten in der Abnahmerate der Laktatkonzentration sowie der Halbwertszeit ermitteln. Evans & Cureton (1983) führten bereits in früheren Untersuchungen nach einem 6-wöchigen Trainingsprogramm an, welches zu einer signifikanten Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit führte, dass keine signifikanten Unterschiede in der Abbaurate des Blutlaktatspiegels bei den Probanden nachzuweisen sind. Somit scheint der Trainingsstatus zwischen einer sehr guten und guten Ausdauerleistungsfähigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf die Laktatabbaurate nach HIIT-Programmen zu haben. Zwischen Trainierten und untrainierten Personen ist ein Unterschied in der Regeneration, durch trainingsbedingte Stoffwechsel- und Kreislaufanpassungen nach kurzen, hochintensiven Intervallbelastungen, in Form der Herzfrequenzwiederherstellung und der Laktatabbaurate in einigen Studien belegt worden (Bonen & Belcastro, 1976; Freund et al., 1992).

Anhand der vorliegenden Ergebnisse ist aber zu vermuten, dass eine weitere Steigerung der aeroben Fitness die Erholung nach anaeroben Belastungen auf metabolischer Ebene nicht wesentlich weiter verbessert. Innerhalb der Phase der schnell regenerierenden Funktionssysteme, welche unter anderem durch die Herzfrequenzwiederherstellung und die Ventilation gekennzeichnet sind, konnte stattdessen ein positiver Einfluss einer erhöhten Ausdauerleistungsfähigkeit festgestellt werden.

### *Einfluss des Alters auf die Belastungs- und Erholungskinetik*

Zur Sicherstellung einer validen Überprüfung der aufgestellten Forschungsfragen, in Bezug auf das kalendarische Alter, wurde, wie bereits in der Ergebnisdarstellung (Vgl. Kapitel 5.3) aufgezeigt, das Probandenkollektiv hinsichtlich junger Athleten (U30 -  $24,35 \pm 3,28$  Jahre) sowie Altersklassensportlern (Ü40 –  $52,63 \pm 7,14$  Jahre) klassifiziert. Bei der Einteilung der Altersgruppen ist darauf geachtet worden, dass sich die beiden Probandenkollektive neben dem kalendarischen Alter ausschließlich anhand vermutlich altersbedingter Parameter, wie der Fettmasse oder der absoluten maximalen Sauerstoffaufnahme signifikant unterscheiden. Wahrscheinlich

leistungsbeeinflussende Parameter, wie die Ausdauerleistungsfähigkeit (nach dem KUADC-Perzentil) oder das Trainingspensum pro Woche weisen im Mittel keine Signifikanzen zwischen jungen Athleten und Altersklassensportlern auf. Somit ist davon auszugehen, dass die im fünften Kapitel aufgeführten Ergebnisse anhand zweier Probandengruppen entstanden sind, die sich grundlegend im Alter, nicht aber in anderen möglichen leistungsvariierenden Faktoren unterscheiden.

Das dritte Hauptziel der vorliegenden Studie beinhaltete die Überprüfung, inwiefern das kalendarische Alter einen Einfluss auf die Belastungs- und die Erholungskinetik nach lokomotorischen Intervallbelastungen hat. Um diese Zielstellung zu bearbeiten, wurde, wie bereits bei der Analyse der Geschlechtsspezifität sowie des Ausdauerleistungsniveaus auch hier das Hauptaugenmerk auf die Auswertung der erbrachten physikalischen Leistungen und des prozentualen Leistungsabfalls während der einzelnen Intervallbelastungen sowie über den gesamten Testverlauf bei jungen Athleten und Altersklassensportlern gelegt. Weiterhin erfolgten die Analyse der Herzfrequenz- und Blutlaktatkinetik nach wiederkehrenden, hochintensiven Intervallbelastungen sowie die Überprüfung des Einflusses des kalendarischen Alters auf den Leistungsabfall bei HIIT-Programmen mit unterschiedlichen Pausenlängen.

Die erste formulierte Forschungshypothese stellte dabei die Vermutung auf, dass jüngere Athleten bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit im Vergleich zu Altersklassensportlern eine höhere maximale und durchschnittliche Leistung bei lokomotorischen Intervallbelastungen erreichen (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 9). Zur Prüfung der Forschungshypothese sind die erbrachten maximalen und durchschnittlichen Leistungen (in W/kg) für jeden einzelnen WAnT sowie die unterschiedlichen Testprotokolle für beide Altersklassen in die Auswertung eingeflossen.

Anhand der in Kapitel 5.3.1 und Kapitel 5.3.2 dargestellten Ergebnisse zeigt sich, dass die jungen Athleten höhere Leistungen sowohl in der Spitze als auch im Durchschnitt erbringen können. Die auftretenden Leistungsunterschiede zwischen beiden Probandengruppen sind allerdings nicht ausnahmslos signifikant. Eine detailliertere Analyse der Ergebnisse ist daher notwendig. Bei 1-minütiger Pausenlänge zeigt sich sowohl bei maximaler als auch durchschnittlicher Leistung, dass mit zunehmendem Testverlauf die Differenz in der Tretleistung zwischen jungen Athleten und Altersklassensportlern abnimmt. Sind die Leistungsdifferenzen bei den ersten drei Intervallbelastungen noch signifikant, ist dies bei der vierten Ausbelastung nicht mehr feststellbar. Bei 3-minütiger und 10-minütiger Pausenlänge zwischen den Intervallbelastungen sind bei der durchschnittlichen Leistung keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen beiden Probandengruppen nachweisbar. Bei der maximalen Leistung während dem Testprotokoll mit 3-minütiger Pausenlänge zeigt sich, ähnlich wie bei 1-minütiger Regenerationszeit, dass die Leistungsdifferenz mit zunehmendem Testverlauf abnimmt. Lediglich bei 10-minütiger Pausenzeit zwischen

den Intervallen bleiben die Unterschiede über das HIIT-Programm nahezu konstant. Es scheint also, dass das Alter, bei kurzen Intervallpausenzeiten und einem damit verbundenen höheren Ermüdungsgrad für den Sportler, einen Einfluss auf die maximale und durchschnittliche Leistungserbringung während eines HIIT-Programms hat. Mit zunehmender Regenerationslänge ist zu vermuten, dass sich ein möglicher negativer Einfluss des Alters, vor allem bei der durchschnittlichen Leistung relativiert.

Zur weiteren Analyse sind im Folgenden die maximalen und durchschnittlichen Leistungen aller vier WAnTs hinsichtlich der unterschiedlichen Testprotokolle mit einbezogen worden. Ein Interaktionseffekt zwischen der Pausenlänge und dem Alter konnte dabei weder für die maximale noch für die durchschnittliche Leistung festgestellt werden. Allerdings ist ein Haupteffekt für das Innersubjekt Pausenlänge nachweisbar. Somit zeigt sich, dass die Länge der Pausenzeit zwischen den Intervallbelastungen einen Einfluss auf die Leistungserbringung hat. Sowohl die maximale als auch die durchschnittliche Leistung steigt mit zunehmender Pausenzeit an. Ebenfalls konnte ein signifikanter Haupteffekt Alter für die maximale Leistung nachgewiesen werden. Dadurch zeigt sich, dass das Alter einen negativen Einfluss auf die Erbringung der maximalen Leistung bei kurzen, hochintensiven Belastungen hat.

Mit zunehmenden Alter kommt es zu einer Abnahme der Muskelmasse sowie zu einer Atrophie der schnellzuckenden Muskelfasern, was wiederum in einer Verschiebung zu einem oxidativeren Muskelprofil resultiert (Porter et al., 1995). Aufgrund dieser veränderten Muskeleigenschaften kann es zu einer verringerten Stoffwechsellkapazität von Kreatinphosphat (PCr) kommen, was zu negativen Auswirkungen auf die maximale Leistungserbringung während hochintensiver Belastungen führen kann. Weiterhin ist es auch möglich, dass der altersspezifische Unterschied in der Erbringung von maximalen Leistungen aufgrund einer altersbedingten Verschlechterung der intramuskulären Koordination oder einer abnehmenden Erregbarkeit der spinalen Motoneurone zustande kommt.

Bei der durchschnittlichen Leistung ist der signifikante Haupteffekt nicht aufgezeigt worden. In Bezug auf die durchschnittliche Leistungserbringung auf dem Radergometer konnten Fell et al. (2008) und Fell & Williams (2008) in ihren Untersuchungen ebenfalls keinen altersspezifischen Unterschied zwischen jungen Probanden und Altersklassensportlern feststellen. Über ein 30-minütiges Zeitfahren auf dem Radergometer wiesen die jungen Athleten und die Altersklassensportler keinen signifikanten Unterschied in der durchschnittlichen Leistung auf. Allerdings muss bei der Einordnung der Ergebnisse beachtet werden, dass die Probanden eine Dauerleistung über 30 Minuten erbringen mussten und keine kurzen, hochintensiven Intervallbelastungen.

Die erlangten Erkenntnisse der vorliegenden Studie lassen die Vermutung zu, dass die altersbedingten Veränderungen bezüglich der verringerten Muskelmasse und einer damit verbundenen reduzierten Muskelkraft bei älteren Personen (Klitgaard et al., 1990; Sipilä et al., 1991) vor allem einen negativen Einfluss auf die Erbringung



der maximalen Leistung bei wiederkehrenden hochintensiven Belastungen haben. Durch die hormonellen und immunologischen Veränderungen im Altersverlauf, die eine Abnahme von Wachstumshormonen und eine Zunahme von Interleukin oder Myostatin nach sich ziehen (Glenmark et al., 1992; McCormick & Vasilaki, 2018), führt die Abnahme der anabol wirkenden Androgene unter anderem zu einer Rückbildung der Muskelfasergröße. Dieser Prozess geht zugleich mit einer Verringerung der Muskelkraft einher (Finkelstein et al., 2013). Als weiteren Erklärungsansatz für die geschlechtsspezifischen Unterschiede in den maximalen Leistungen dient die von Meltzer (1994) postulierte Verlustrate der Maximalkraft im Altersverlauf. Mit steigendem Alter kommt es zu einem Rückgang der Größe und der Anzahl von Typ-II-Muskelfasern, was wiederum ein Verlust von Muskelmasse und Kraft nach sich zieht (Lexell & Downham, 1992). Auch Bieuzen et al. (2010) fanden bei maximalen, willkürlichen Muskelkontraktionen an der Beinpresse einen Altersunterschied. Die Altersklassensportler wiesen im Vergleich zu jungen Athleten eine um 29 % geringe maximale Leistung auf. Klassischerweise wird in der Literatur ein Rückgang der isometrischen Muskelkraft im musculus quadriceps von 15 bis 35 % im Alter von 60 Jahren, verglichen mit der Phase der höchsten Leistungsfähigkeit angegeben. Der Leistungsunterschied in der vorliegenden Studie zwischen beiden Altersklassen liegt mit ungefähr 12 % unter der angegebenen Verlustspanne. Dies kann allerdings auf das jüngere Durchschnittsalter der Altersklassensportler ( $52,63 \pm 7,14$  Jahre) zurückzuführen sein. Dennoch scheint es, dass die maximale Muskelleistung im Alter, durch einen Verlust von Muskelfasern (insbesondere Typ-II-Fasern), Änderungen in der Verteilung von Muskelfasertypen (Lexell, 1995; Porter et al., 1995) sowie einer Verringerung des Muskelvolumens und der Querschnittsfläche abnimmt (Häkkinen & Keskinen, 1989). Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die anaerobe Energieabgabe mit zunehmenden Alter, aufgrund einer Reduzierung der glykolytischen Enzyme, insbesondere der Phosphofruktokinase sinkt (Hunter et al., 2002). Des Weiteren nimmt im Altersverlauf die Konzentration des Glukosetransporters Typ 4 (GLUT-4) ab, was wiederum in einer reduzierten Wirksamkeit des Glukosetransports mündet und letztendlich die maximale Leistung bei Altersklassensportlern negativ beeinflussen kann (Hall et al., 1994). Hinsichtlich der durchschnittlichen Leistung während eines HIIT-Programms scheinen die aufgezeigten altersbedingten Veränderungen nicht derartig ausschlaggebend zu sein. Ein Ausdauertraining führt auch bei älteren Personen zu einer strukturellen und metabolischen Anpassung der Skelettmuskulatur (Coggan et al., 1993), was wiederum die altersbedingten hormonellen und immunologischen Veränderungen im Altersverlauf, vor allem bei der durchschnittlichen Leistung während eines HIIT-Programms scheinbar konterkarieren kann.

Die Tendenz, dass mit steigender Pausenlänge und einer damit verbundenen Verringerung des Ermüdungsgrades der Sportler, die altersspezifischen Unterschiede in der Leistungserbringung abnehmen, soll mit einer weiteren Forschungshypothese noch eingehender betrachtet werden. Dabei wurde im Vorfeld die Vermutung aufgestellt, dass jüngere Athleten im Vergleich zu Altersklassensportlern bei

lokomotorischen Intervallbelastungen eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingtem Leistungsabfall sowie einen höheren Ermüdungsresistenz über das gesamte HIIT-Programm aufweisen (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 10). Zur Überprüfung der aufgestellten Arbeitshypothese sind der prozentuale Leistungsabfall für jeden einzelnen WAnT ( $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{WAnT}}$ ) sowie für die unterschiedlichen Testprotokolle ermittelt worden. Weiterhin wurde der prozentuale Leistungsabfall zwischen der ersten und vierten 30-sekündigen Ausbelastung ( $\% \text{Leistungsabfall}_{\text{HIIT}}$ ) berechnet und für die verschiedenen Testdesigns aufgeführt (Vgl. Kapitel 5.3.1 und Kapitel 5.3.2).

Anhand der dargestellten Ergebnisse zeigt sich, unabhängig von der Pausenzeit, dass es keine signifikanten Unterschiede in dem prozentualen Leistungsabfall innerhalb der jeweiligen 30-sekündigen Ausbelastungen gibt. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenzeit zwischen den Intervallbelastungen ist bei den Altersklassensportlern im Vergleich zu den jungen Athleten kein erhöhter Leistungsabfall während der Intervallbelastungen festzustellen. Die gleiche Aussage lässt sich bezogen auf die unterschiedlichen Testprotokolle treffen. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenlänge gibt es keinen signifikanten Unterschied in der Ermüdungswiderstandsfähigkeit zwischen beiden Altersgruppen.

Ein Interaktionseffekt zwischen Pausenlänge und Alter ist ebenfalls nicht nachweisbar. Gleiches lässt sich für die differenzierte Betrachtung des Innersubjektfaktors Pausenlänge und des Zwischensubjektfaktors Alter feststellen.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Länge der Pausenzeit keinen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingtem Leistungsabfall innerhalb der Intervallbelastung hat. Des Weiteren kann ein Einfluss des kalendarischen Alters auf den Leistungsabfall bei kurzen, hochintensiven Intervallbelastungen ausgeschlossen werden. Die Einbeziehung des prozentualen Leistungsabfalls über das komplette HIIT-Programm, was eine Aussage über den Ermüdungsgrad der Sportler zulässt, zeigt ebenfalls, dass zwischen beiden Altersgruppen kein signifikanter Unterschied auftritt. Die Altersklassensportler weisen im Vergleich zu den jungen Athleten bei 1-minütiger und 3-minütiger Pausenlänge im Mittel einen geringeren prozentualen Leistungsabfall zwischen dem ersten und vierten WAnT auf, währenddessen er bei 10-minütiger Regenerationszeit nahezu identisch ausfällt. Daher ist es nicht weiter überraschend, dass kein statistischer Interaktionseffekt zwischen Pausenlänge und Alter auftritt. Eine Wirkung des Haupteffektes Pausenlänge auf den prozentualen Leistungsabfall konnte dagegen nachgewiesen werden. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Regenerationszeit der Ermüdungsgrad über den Verlauf des HIIT-Programms abnimmt. Der Einfluss des Haupteffektes Alter ist dahingegen nicht aufgezeigt worden. Da kein Unterschied, bezugnehmend auf das Alter in der Ermüdungsresistenz während eines HIIT-Programms zu ermitteln ist, scheinen sowohl junge Athleten als auch Altersklassensportler durch lokomotorische Intervallbelastungen gleichermaßen beansprucht zu werden. Ähnliche Ergebnisse

konnte Bieuzen et al. (2010) in ihrer Studie anhand von jungen und alten Probanden mit gleichen Trainingslevel aufzeigen. Während hochintensiver, wiederkehrender Belastungen an der Beinpresse konnten die Autoren zwar einen signifikanten Altersunterschied bei der maximalen isometrischen Kontraktion feststellen (ältere Probanden -29,4 %), allerdings nicht im Leistungsabfall über den kompletten Testverlauf. Die jungen Probanden wiesen über die gesamte Untersuchung einen prozentualen Leistungsabfall von 14,3 % auf, währenddessen die älteren Probanden mit einer prozentualen Ermüdung von 9,7 % einen geringeren Abfall erzielten. Anhand dieser Ergebnisse schlussfolgerten die Autoren, dass die Muskelfunktionskapazität bei ausdauertrainierten, älteren Personen trotz altersbedingter Kraftverluste sowie der Einschränkung kontraktile Mechanismen erhalten werden kann. Coggan et al. (1990) und Tarpinning et al. (2004) zeigten anhand ihrer Untersuchungen ähnliche altersbedingte Verluste der Kraffleistungen bei Altersklassensportlern. Sie konnten feststellen, dass sowohl die Muskelfaserverteilung als auch die Muskelfaserfläche bei Altersklassensportlern erhalten bleiben kann. Daher vermuteten sie, dass der Rückgang der Muskelleistung auf neuronale Faktoren, wie die Muskelrekrutierung oder die spezifische Muskelspannung zurückzuführen sind. Dennoch scheint es so, dass durch ein regelmäßiges Ausdauertraining im Alter die Änderungen in den Muskelmorphologieeigenschaften verzögert werden können (Tarpinning et al., 2004).

Weitere Studien bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, dass kein altersspezifischer Unterschied im Leistungsabfall bei wiederkehrenden Belastungen vorliegt (Allman & Rice, 2001; Bembien et al., 1996; Laforest et al., 1990). Bezugnehmend auf die Ergebnisse und Schlussfolgerungen von Coggan et al. (1990) und Tarpinning et al. (2004) stellten Bieuzen et al. (2010) die Vermutung auf, dass ein regelmäßiges Ausdauertraining den ermüdenden Effekt auf die neuromuskuläre Leistung mit zunehmenden Alter, durch eine geringere Abnahme der neuronalen Faktoren, verringert.

Einen weiteren Erklärungsansatz hinsichtlich einer ähnlichen Ermüdung bei wiederkehrenden Belastungen zwischen jungen Athleten und Altersklassensportlern könnte die altersbedingte Verschiebung hin zu einem oxidativeren Muskelprofil sowie die gute Trainierbarkeit der oxidativen Kapazität bis ins hohe Alter liefern (Porter et al., 1995). Aufgrund des altersbedingten Kraftverlustes können die Altersklassensportler zwar eine geringere Initialleistung erbringen, aber durch eine ähnlich hohe oxidative Kapazität sind sie ebenfalls in der Lage gleichermaßen hohe durchschnittliche Leistungen sowie eine ähnliche Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall aufzuweisen, im Vergleich zu jungen Athleten mit gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit.

Abschließend können diese Erkenntnisse durch die Betrachtung der Korrelation zwischen dem Alter und dem Leistungsabfall während der Intervallbelastung bestätigt werden. Unabhängig von der Pausenlänge (1-minütige, 3-minütige oder 10-minütige Regenerationsphase) ist lediglich ein kleiner positiver Zusammenhang

zwischen dem kalendarischen Alter und dem prozentualen Leistungsabfall während der Ausbelastung festzustellen.

Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass ein zunehmendes Alter nicht zwangsläufig zu einer altersbedingten Verringerung der Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall führt. Ähnliche Erkenntnisse konnten Fell et al. (2008) und Fell & Williams (2008) in ihrer Studie nachweisen. Ältere Sportler verzeichneten bei aufeinanderfolgenden Belastungen auf dem Radergometer keinen signifikanten Leistungsabfall im Vergleich zu jungen Athleten. Bei den Altersklassensportler kam es lediglich zu signifikanten Veränderungen in der Wahrnehmung des Muskelschmerzes, der Muskelermüdung sowie der Muskelerholung über den gesamten Testverlauf. Die Wissenschaftler schlussfolgerten aus dieser Erkenntnis, dass hochintensive Belastungen bei Altersklassensportlern zwar eine wahrgenommene verminderte Erholung sowie erhöhte Müdigkeit hervorrufen, dies die körperliche Leistungsfähigkeit allerdings nicht reduziert. Werden die RPE- und TQR-Werte, die direkt nach der Intervallbelastung beziehungsweise in der Pause zwischen den WAnTs bestimmt wurden mit in die Betrachtung einbezogen, so lässt sich die wahrgenommene verminderte Erholung, sowie die erhöhte Müdigkeit bei Altersklassensportlern nicht bestätigen. In allen drei Testprotokollen weisen die Altersklassensportler zwar eine minimal höhere wahrgenommene Anstrengung auf (1 min:  $18,47 \pm 0,80$  vs.  $18,03 \pm 1,03$ ; 3 min:  $18,14 \pm 0,61$  vs.  $17,89 \pm 0,88$ ; 10 min:  $17,96 \pm 0,52$  vs.  $17,19 \pm 0,80$ ), allerdings lassen sich keine signifikanten altersspezifischen Unterschiede feststellen. Auch die subjektive Regeneration innerhalb der Belastungspausen lassen keinen signifikanten Unterschied zwischen jungen Athleten und Altersklassensportlern erkennen (1 min:  $11,26 \pm 0,65$  vs.  $10,65 \pm 0,78$ ; 3 min:  $13,42 \pm 0,55$  vs.  $12,95 \pm 0,80$ ; 10 min:  $15,32 \pm 0,09$  vs.  $15,10 \pm 0,35$ ).

Im Gegensatz dazu konnten Hebestreit et al. (1993) bei jüngeren Sportlern im Vergleich zu älteren Athleten bei zwei aufeinanderfolgenden WAnTs eine geringere Ermüdung feststellen. Anhand der Ergebnisse leiteten die Autoren ab, dass jüngere Personen eine schnellere Regeneration nach kurzen hochintensiven Belastungen aufweisen. Aufgrund dessen, dass das Probandenkollektiv allerdings aus Jungen (9-12 Jahre) und jungen Männern (19-23 Jahre) bestand, ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der vorliegenden Studie nicht zwangsläufig herstellbar.

Ob der Erklärungsansatz von Hebestreit et al. (1993), dass jüngere Personen eine verbesserte Regeneration in der Nachbelastungsphase auf metabolischer Ebene aufweisen, auch für die vorliegenden Ergebnisse erhalten kann soll im Folgenden näher begutachtet werden. Nichtsdestotrotz stehen die erlangten Erkenntnisse im Gegensatz zu der aufgestellten Annahme, dass es einen altersspezifischen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während lokomotorischer Intervallbelastungen sowie auf die Ermüdungsresistenz im Verlauf eines HIIT-Programms gibt. Es kann lediglich bestätigt werden, dass ein HIIT-Programm mit längeren Pausenzeiten zwischen den Belastungen sowohl bei jüngeren als auch bei älteren Athleten weniger beanspruchend auf den gesamten

Organismus wirkt. Für die Trainings- und Regenerationssteuerung ist diese Erkenntnis von großer Bedeutung, da die Beanspruchungsform durch die Wahl der Pausenlänge somit ungeachtet der Altersgruppe gezielt gewählt werden kann.

Mit einer weiteren Annahme wurde die Vermutung aufgestellt, dass junge Sportler nach lokomotorischen Intervallbelastungen eine bessere Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz als Altersklassensportler aufweisen (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 11). Für eine umfassende Überprüfung der Forschungshypothese sind sowohl die mittleren Herzfrequenzen während und nach den Intervallbelastungen als auch innerhalb der abschließenden 15-minütigen Nachbelastungsphase zugrunde gelegt worden. Weiterhin wurde die Herzfrequenzwiederherstellung, anhand des berechneten prozentualen Abfalls in die Auswertung einbezogen, um somit einen Aufschluss über die Geschwindigkeit der Regeneration des Herz-Kreislauf-Systems nach Ausbelastungen zu bekommen.

Grundsätzlich zeigt sich, dass die jungen Athleten, unabhängig von der Pausenlänge im Mittel ausnahmslos höhere Belastungsherzfrequenzen nach maximaler Beanspruchung im Vergleich zu Altersklassensportlern aufweisen. Die Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen sind dabei hochsignifikant. Diese Beobachtung bestätigt die aktuelle Studienlage. Allein die trivialen Herzfrequenzformeln, wie  $HF_{\max} = 220 - \text{Lebensalter}$  (Fox et al., 1971) oder  $HF_{\max} = 208 - 0,7 \times \text{Alter}$  (Tanaka et al., 2001) implizieren diesen altersspezifischen Unterschied. Ab dem frühen Erwachsenenalter wird eine Abnahme der maximalen Herzfrequenz um ca. sieben Schläge pro Altersdekade bei gesunden, ausdauertrainierten Erwachsenen vermutet (Tanaka et al., 2001). Als verursachende Mechanismen der Reduzierung der maximalen Herzfrequenz dienen eine verringerte Reaktionsfähigkeit des Sinusknotens auf beta-adrenerge Stimulationen sowie eine verminderte intrinsische Herzfrequenz (Fleg et al., 1994). In den Pausenzeiten sowie der abschließenden 15-minütigen Nachbelastungsphase weisen die jungen Athleten ebenfalls eine im Durchschnitt höhere Herzfrequenz auf, allerdings sind die Differenzen im Vergleich zu den Altersklassensportlern nicht signifikant.

Die im Vorfeld durch das höhere Alter vermutete Beeinträchtigung der Herzfrequenzwiederherstellung nach kurzen, hochintensiven Intervallbelastungen konnte in der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden. Sowohl bei 1-minütiger, 3-minütiger als auch 10-minütiger Pausenzeit sind keine signifikanten Altersunterschiede in dem prozentualen Abfall der Herzfrequenz nach Ausbelastungen feststellbar. Auch Trevizani et al. (2012) konnten anhand ihrer Untersuchungen keinen Einfluss des Alters auf die Herzfrequenzwiederherstellung nach submaximalen Belastungen ermitteln. Sie konnten lediglich feststellen, dass eine bessere aerobe Fitness zu einer schnelleren Regeneration der Herzfrequenz führt. Es zeigt sich allerdings, dass bei 1-minütiger Pausenlänge und einem damit verbundenen höheren Ermüdungsgrad für die Sportler, die jungen Athleten zu allen Messzeitpunkten einen höheren prozentualen Herzfrequenzabfall verzeichnen. Mit

zunehmender Pausenlänge (3- und 10-minütiges Testprotokoll) sind die Herzfrequenzwiederherstellungsraten zwischen beiden Probandengruppen nahezu identisch. Diese Tendenz der verringerten Herzfrequenzerholung bei den Altersklassensportlern bei kurzen Pausenzeiten könnte eine beeinträchtigte Aktivität des Parasympathikus und eine damit verbundene sympathische Dominanz implizieren (Singh et al., 2008). Mit voranschreitender Pausenzeit scheint sich dieser Unterschied zu relativieren. Weiterhin könnte die höhere Herzfrequenzreserve der jungen Athleten, die eine höhere  $HF_{max}$  verglichen mit den Altersklassensportlern aufweisen, zu einer schnelleren Wiederherstellung der Herzfrequenz bei kurzen Pausenzeiten führen.

Keine signifikanten Altersunterschiede konnten Darr et al. (1988) in ihrer Studie zwischen jungen und alten Sportlern mit einem identischen Leistungslevel in Bezug auf die Herzfrequenzwiederherstellung nach Belastungen feststellen. Sowohl nach kurzer (15 - 120 Sekunden nach Belastungsende) als auch langer Regenerationsphase (120 – 240 Sekunden nach Belastungsende) war kein Einfluss des Alters auf die Herzfrequenzwiederherstellung nachweisbar gewesen. Carnethon et al. (2005) konnten bei jungen Erwachsenen einen altersbedingten Rückgang der Herzfrequenzerholung über einen Zeitraum von sieben Jahren feststellen. Eine regelmäßige körperliche Aktivität konnte diesen altersbedingten Effekt allerdings abschwächen. Daher lassen vor allem die Ergebnisse von Trevizani et al. (2012) und Darr et al. (1988) sowie der vorliegenden Studie vermuten, dass ein Trainingseffekt bezüglich der Regenerationsfähigkeit der Herzfrequenz nach Intervallbelastungen vorliegt, aber kein Alterseffekt.

Abschließend ist betrachtet worden, inwiefern sich das Alter auf die Blutlaktatkonzentrationen nach Intervallbelastungen und auf die Laktatabbauraten auswirkt. Dabei ist die Annahme aufgestellt worden, dass jüngere Sportler nach lokomotorischen Intervallbelastungen einen schnelleren Abbau der Laktatkonzentration erzielen als Altersklassensportler (Vgl. Kapitel 3, Hypothese 12). Zur Überprüfung der Hypothese erfolgte die Einbeziehung der Blutlaktatkonzentrationen über den gesamten Testverlauf sowie der ermittelten prozentualen Laktatabbauraten in der Nachbelastungsphase.

Die in Kapitel 5.3.4 dargestellten Laktatkonzentrationen nach den einzelnen WAnTs und der Nachbelastungsphase zeigen, unabhängig von der Pausenlänge keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen. Sowohl bei den erreichten maximalen Laktatkonzentrationen als auch beim Zeitpunkt des Laktatpeaks sind lediglich minimale Unterschiede zwischen beiden Altersgruppen ausmachbar. Einzig bei dem Testprotokoll mit 3-minütiger Pausenlänge wird eine kleine Differenz zwischen beiden Probandengruppen in der Laktatkinetik sowohl in der Belastungs-, als auch der Nachbelastungsphase sichtbar. Hierbei zeigen sich ein etwas steilerer Anstieg der Laktatkonzentration sowie ein höherer Laktatpeak bei den jungen Athleten. Eine statistische Signifikanz zu der Blutlaktatkinetik der

Altersklassensportler ist allerdings ebenfalls nicht feststellbar.

Auch die Analyse der prozentualen Laktatabbaurate während der 15-minütigen Nachbelastungsphase lässt keinen altersspezifischen Einfluss auf metabolischer Ebene erkennen. Bei allen drei Testprotokollen weisen die jungen Athleten eine minimal höhere Laktatabbaurate auf, die Unterschiede zu den Altersklassensportlern sind allerdings nicht signifikant. Somit können verschiedene Erklärungsansätze, die beispielsweise eine Verschiebung des Muskelprofils im Alter in den oxidativen Bereich postulieren (Porter et al., 1995) oder, dass eine altersbedingte Veränderung in der Muskelarchitektur zu einer verringerten Stoffwechsellkapazität von Kreatinphosphat und einer damit reduzierten Geschwindigkeit von Glykolyse und Laktatbildung führen (Hunter et al., 2002), durch die aufgezeigten Ergebnisse nicht bestätigt werden. Vielmehr scheinen die Erkenntnisse hinsichtlich der nicht vorhandenen altersspezifischen Unterschiede bei den Blutlaktatkonzentrationen und der Abbaurate auf eine ähnliche metabolische Ausbelastung beider Probandengruppen hinzudeuten. Es ist zu vermuten, dass sich die Regeneration auf metabolischer Ebene im Anschluss an ein kurzes, hochintensives Intervalltraining nicht altersbedingt unterscheidet. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass die Trainierbarkeit des Organismus im höheren Alter beibehalten werden kann.

Gleiche Erkenntnisse lieferten Silverman & Mazzeo (1996) anhand ihrer Studie. Sie zeigten, dass ein Ausdauertraining, bei einem gleichen metabolischen Stress auch bei älteren Menschen die Wachstumshormonreaktion verbessert und eine ähnliche Leistungserbringung wie bei jüngeren, trainierten Personen ermöglicht. Hagberg et al. (1988) unterstützen diese Erkenntnis, indem sie zugleich feststellten, dass Ausdauertraining die Wachstumshormonreaktion auf submaximale Belastungen bei älteren Personen erhöhen kann.

Es scheint, dass Ausdauertraining auch im Alter zu positiven physiologischen Adaptionen führt, welche die im Vorfeld aufgeführten negativen Alterseffekte ausgleichen können. Auch im höheren Alter führt eine höhere Wachstumshormonproduktion zu einer erhöhten Muskelmasse, einem verringerten Körperfettanteil, einem erhöhten Herzzeitvolumen und letztendlich auch zu einer verbesserten maximalen Trainingsleistung (Rudman et al., 1990). Auch Bieuzen et al. (2010) gingen bekanntlich auf Grundlage ihrer Untersuchungen zur neuromuskulären Ermüdung während eines HIIT von einer Trainierbarkeit bis ins höhere Alter aus. Folglich kann geschlussfolgert werden, dass die Belastungs- und Regenerationssteuerung von Athleten verschiedener Altersklassen während eines HIIT, bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit, auf dieselbe Art und Weise vorgenommen werden kann.

## *Limitation*

Im Verlauf der Datenerhebung sowie der Auswertung haben sich einige methodische Aspekte ergeben, welche möglicherweise eine limitierende Wirkung auf die Ergebnisse der Forschungsarbeit haben könnten. Im Folgenden werden diese Limitationen methodenkritisch benannt, um eine korrekte Einschätzung der Ergebnisse vornehmen zu können und für zukünftige Forschungsarbeiten genau zu dokumentieren.

Grundsätzlich ist im Vorfeld der Untersuchung jeder Proband bezüglich der Nahrungsaufnahme und des Konsums von Koffein, Alkohol und Nikotin instruiert worden, allerdings ist keine exakte Protokollierung der Nahrungsaufnahme mittels Ernährungstagebuch erfolgt. Es ist lediglich die letzte Nikotinzufuhr vor der Testung dokumentiert worden, da dies einen Einfluss auf die erhobenen Herz-Kreislauf-Parameter, die Ventilation sowie die Hämodynamik haben kann. Die Vorgabe einer „mischköstigen“ Ernährungsweise im Verlauf der Untersuchung obliegt einer gewissen Streubreite an Ernährungsformen.

Weiterhin verursachte die zeitliche Instruktion zur letzten Mahlzeit vor der jeweiligen Testung, dass Probanden, die ihre Untersuchung in den frühen Morgenstunden absolvierten teilweise ihr Frühstück ausgelassen haben. Somit kam es zu der Situation, dass diese Probanden ein Nüchterntraining absolvierten. Da in der nächtlichen Nahrungskarenz schon auf Glykogenspeicher der Leber als Energiereserve zurückgegriffen werden musste, starteten diese Probanden schon mit teilentleerten Energiespeichern in den Untersuchungstag. Somit könnte es, besonders durch die hohe Intensität der Untersuchung, zu einer Leistungsminderung der Probanden gekommen sein.

Daher sollten bei zukünftigen Studien detailliertere Vorgaben zur Nahrungsaufnahme in Betracht gezogen werden, um Unterschiede in der Leistungsfähigkeit aufgrund verschiedener Energiereserven zu minimieren. Weiterhin ist es überlegenswert, dass die Probanden über den Zeitraum der Testdurchführung ein Ernährungstagebuch führen, um einen möglichen Einfluss der im Vorfeld aufgenommenen Nahrung auf die Untersuchungsergebnisse mit einzubeziehen.

Darüber hinaus ist das fortgeführte Training der Probanden zwischen den einzelnen Untersuchungstagen nicht detailliert dokumentiert worden. Die Teilnehmer hatten die Vorgabe 12 Stunden vor der Untersuchung keine hochintensive körperliche Belastung durchzuführen. In sehr wenigen Fällen kam es vor, dass Probanden aufgrund von Krankheit, dienstlichen Verpflichtungen oder Urlaub ihren Testzeitraum über die optimale Wochenangabe strecken mussten. Daher ist es möglich, dass das fortgeführte Training oder die zwangsläufige Trainingspause zwischen den Testtagen die Leistungsfähigkeit positiv beziehungsweise negativ beeinflusst haben.

Einen weiteren methodenkritischen Ansatz liefert die Wattleistung innerhalb der aktiven Entlastungsphasen zwischen den Intervallbelastungen sowie der



Nachbelastungsphase. Hierbei kam es zu einer geschlechtsspezifischen Festlegung, infolgedessen der Tretwiderstand bei Frauen 70 W und bei Männern 100 W betrug. Vor allem bei Probanden mit einem geringen Körpergewicht kann der Widerstand von 70 bzw. 100 W nach einer Ausbelastung als zu intensiv gewählt gewesen sein. Aufgrund dessen kann es zu negativen Auswirkungen auf die Wiederherstellungsprozesse des Herz-Kreislauf-Systems, der Ventilation sowie der Laktatakkumulation gekommen sein. Für folgende Studien ist daher eine differenzierte Festlegung des Widerstandes, relativiert auf das individuelle Körpergewicht, die  $VO_{2max}$  oder die fettfreie Masse zu überlegen.

Der Limitationsansatz ist allerdings dadurch zu entkräften, dass die männlichen Probanden im Vergleich zu den Frauen eine signifikant höhere Leistung in den einzelnen Intervallbelastungen erzielt haben, was wiederum eine geschlechtsspezifische Differenzierung der Pausen- und Nachbelastungsleistungen zulässt.

Weiterhin ist kritisch anzumerken, dass die erbrachten Leistungen während des WAnT stark von der Eigenmotivation der Probanden abhängig gewesen sind. Trotz lautstarker Anfeuerungen durch den Testleiter und einer Dokumentation des BORG-Wertes nach jeder durchgeführten Ausbelastung, ist nicht auszuschließen, dass einige Probanden ihr Leistungslimit nicht erreicht haben. Eine Betrachtung der RPE-Werte im Geschlechtervergleich zeigt beispielsweise, dass die männlichen Probanden eine durchschnittlich höhere subjektive Anstrengung direkt nach den WAnTs angegeben haben. Sowohl bei 1-minütiger Pause ( $18,36 \pm 0,98$  vs.  $17,67 \pm 1,02$ ), bei 3-minütiger Regenerationszeit ( $18,07 \pm 0,79$  vs.  $17,38 \pm 0,87$ ) als auch bei 10-minütiger Pausenlänge ( $18,04 \pm 0,57$  vs.  $16,54 \pm 0,90$ ) weisen die Männer im Vergleich zu den Frauen höhere RPE-Werte auf. Die Geschlechtsunterschiede sind allerdings nicht signifikant.

Dennoch ist für zukünftige Untersuchungen zu überlegen, nur erbrachte Leistungen in die Auswertung einzubeziehen, bei denen ein gewisser Prozentsatz der  $VO_{2max}$  erreicht worden ist.

Darüber hinaus ist die Thematik der hormonellen Schwankungen während des weiblichen Menstruationszykluses und der Nutzung oraler Kontrazeptiva sowie dessen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und die Regeneration bei hochintensiven Intervallbelastungen nicht ausreichend berücksichtigt worden. Bis dato haben sich viele Forschungsgruppen mit den Auswirkungen der unterschiedlichen Hormonkonstellationen während verschiedener Phasen des weiblichen Zyklus beschäftigt, ebenso wie mit den Auswirkungen des künstlich provozierten Zyklus durch orale Kontrazeptiva. Elliott-Sale et al. (2020) konnten zwar in ihrer Meta-Analyse keine eindeutigen Auswirkungen auf die Leistung durch orale Kontrazeptiva belegen, jedoch geht dies möglicherweise auf eine eher schlechte bis mittelmäßige Qualität der bisherigen Forschungsstudien zurück. Auch die Studienlage zu den Unterschieden während der Zyklusphasen ist sehr divers (Oosthuyse & Bosch, 2010).

Auf Grundlage einiger Studien besteht die Annahme, dass sich der Substratstoffwechsel bei Frauen zwischen der frühen follikulären Phase und der mittleren lutealen Phase deutlich voneinander unterscheidet und somit keine Vergleichbarkeit mit männlichen Athleten mehr gegeben ist. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Athleten zu gewährleisten, wird empfohlen Frauen in der frühen follikulären Phase für Testungen heranzuziehen. Diese Phase ist charakterisiert durch niedrige Konzentrationen an freiem Östrogen und Progesteron, was Hormonkonstellation männlicher Athleten am nächsten kommt (Hauswirth & Le Meur, 2011).

Mit Blick auf die Forschungslage kann zwar nicht konkret von einer Verfälschung der Untersuchungsergebnisse aufgrund der Hormonkonstellation der weiblichen Probanden gesprochen werden, individuelle Unterschiede aufgrund dessen sind jedoch ebenfalls nicht auszuschließen. Um die Aspekte des weiblichen Zyklus und der oralen Kontrazeptiva in Zukunft in die Auswertung leistungsbezogener Daten miteinzubeziehen, wäre eine Dokumentation sowohl der Zyklusphase als auch der Einnahme von oralen Kontrazeptiva definitiv zu empfehlen.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Studie stellt einen experimentellen Ansatz dar, den Einfluss von einem Geschlechtsdimorphismus, der Ausdauerleistungsfähigkeit und des Alters auf die Belastungs- und Erholungskinetik bei lokomotorischen Intervallbelastungen näher zu untersuchen. Hinsichtlich der aktuellen Studienlage zu der Thematik konnten mittels der aufgestellten Zielstellung und den darauf basierenden Hauptfragestellungen ergänzende und neue Erkenntnisse geliefert werden. Auf Grundlage der beschriebenen Sachverhalte konnte als eines der zentralen Ergebnisse belegt werden, dass ein Geschlechtsdimorphismus in der Belastungs- und Erholungskinetik nach kurzen, hochintensiven Intervallbelastungen besteht. Die Tatsache, dass Männer während intermittierender Ausbelastungen im Vergleich zu Frauen, bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit, höhere relative Leistungen erbringen sowie eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während einer maximalen Belastung aufweisen, ist dabei nur ein wesentlicher Geschlechtsunterschied. Weiterhin zeigte sich, dass das Geschlecht einen entscheidenden Einfluss auf den Leistungsabfall über den gesamten Verlauf eines HIIT-Programms hat. Frauen weisen dabei eine höhere Ermüdungsresistenz gegenüber intermittierenden hochintensiven Belastungen auf. Dieses Ergebnis stützt die aktuelle Studienlage, dass der weibliche Organismus bei wiederkehrenden, maximalen Belastungen einen geringeren Ermüdungsgrad aufzeigt und somit weniger beansprucht wird als Männer. Dieser geschlechtsspezifische Unterschied stellte sich insbesondere bei kurzen (eine Minute) und langen interseriellen Pausenzeiten (10 Minuten) deutlich dar.

Anhand der unterschiedlichen Ausprägungen des Ermüdungszustandes bei Intervallbelastungen scheinen daher geschlechtsspezifische Pausenzeiten während eines HIIT-Programms notwendig. Die Tatsache, dass Männer bei 3-minütigen Pausenzeiten einen ähnlichen Ermüdungszustand erreichen, wie Frauen bei 1-minütigen interseriellen Regenerationszeiten, lässt die Schlussfolgerung zu, dass für weibliche Sportler eher ein HIIT mit kurzen aktiven Intervallpausen geeignet zu sein scheint. Für Männer sind, bei der Verfolgung des gleichen Trainingsziels eher längere Pausenlängen anzustreben. Interaktionseffekte zwischen Geschlecht und Pausenlänge in Bezug auf die Leistung und die Ermüdungsresistenz konnten nicht nachgewiesen werden. Wenig überraschend zeigt sich allerdings, dass mit zunehmender interserieller Regenerationszeit die Leistung, sowie die Ermüdungsresistenz bei beiden Geschlechtern anstieg. Beide Probandengruppen konnten somit, aufgrund des geringeren Ermüdungsgrades, höhere Leistungen erbringen. Ein Interaktionseffekt Geschlecht x Pausenlänge in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während einer Intervallbelastung konnte dahingegen nachgewiesen werden. Diese Erkenntnis stützt nochmals die Schlussfolgerung, dass Frauen eher von kurzen Intervallpausen profitieren.

Ein Geschlechtsdimorphismus konnte nicht nur in der Belastungsphase aufgezeigt werden, sondern wurde ebenfalls während der interseriellen Pausen sowie der Nachbelastungsphase ermittelt. So ist ein Geschlechtsunterschied in den schnellen (Herzfrequenz) und langsamen Wiederherstellungsprozessen (Laktatabbau) nach lokomotorischen Intervallbelastungen dargestellt worden. Die Erkenntnisse, dass Männer eine schnellere Regeneration der Herzfrequenz aufweisen, sowie Frauen eine höhere Laktatabbaurrate erzielen, stützt die vorangegangene Empfehlung, dass Frauen bei einem gleichen Trainingsziel kürzere Intervallpausen absolvieren können. Führen sowohl Männer als auch Frauen ein HIIT-Programm mit langen Pausenzeiten durch, so ist darauf zu achten, dass Frauen, aufgrund der besseren Regenerationsfähigkeit auf metabolischer Ebene eine höhere Intervallwiederholungszahl zur Erreichung des gleichen Trainingsziels absolvieren. Werden die geschlechtsspezifischen Erkenntnisse auf die von Buchheit & Laursen (2013a) erstellte Methodik zur Konzipierung eines HIIT-Programms übertragen, so können die Empfehlungen in Bezug auf die Belastungs- und Regenerationssteuerung noch weiter spezifiziert werden. Beide Wissenschaftler stellten bereits fest, dass langfristige physiologische Adaptationen durch ein HIIT wahrscheinlich sehr individuell und in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht und Trainingszustand sein können. Grundsätzlich klassifizieren die Autoren ein hochintensives Intervalltraining in verschiedene Kategorien. Dabei unterscheiden sie in wiederholende kurze (< 45 Sekunden) und lange Belastungen (2-4 Minuten) mit hoher, aber nicht maximaler Intensität sowie kurze intermittierende Sprintbelastungen (< 10 Sekunden) und lange All-Out-Sprints (> 20-30 Sekunden), die jeweils von Regenerationsphasen unterbrochen sind. Die Auswahl des jeweiligen HIIT-Programms ist dabei von verschiedenen Aspekten abhängig, wie der Trainingszielstellung, der Sportart, dem Trainingszyklus (Vorbereitungs- oder Wettkampfphase), der Tageszeit sowie des Geschlechts und der Leistungsfähigkeit. Weiterhin postulieren beide Wissenschaftler, dass die Steuerung eines HIIT, welches die Verbesserung der kardiorespiratorischen und metabolischen Funktionen sowie darauf basierend die Leistung des Sportlers verbessern soll, durch neun verschiedene Variablen erfolgen kann. Diese neun Steuerparameter beinhalten die Intensität und Dauer des Intervalls sowie der Pausenzeit, die Übungsausführung, die Anzahl der Wiederholungen und Serien sowie die Dauer und Intensität der Serienpausen. Die Änderung einer Variablen hat bereits einen Einfluss auf die physiologische Reaktion des Organismus (kardiopulmonal, metabolisch, neuromuskulär) während des HIIT-Programms. Die Intensität und die Dauer der Arbeits- und Entlastungsintervalle sind die entscheidenden Einflussfaktoren bei der Steuerung des Trainings. Anhand dieser Schlüsselfaktoren nahmen Buchheit & Laursen (2013b) folgende Einteilungen eines HIIT vor:

1. Sehr kurze Belastungsdauer:  $\leq 15$  Sekunden, z. B.: 8-10 x 15 Sekunden Belastung (100-120 %  $vVO_{2max}$ ) / 15 Sekunden passive Pause
2. Mittlere Belastungsdauer:  $< 45$  Sekunden, z. B.: 12 x 30 Sekunden Belastung (90-95 %  $HF_{max}$ ) / 30 Sekunden Pause (50-60 %  $HF_{max}$ )
3. Lange Belastungsdauer: 2-4 Minuten, z. B.: 4-6 x 4 Minuten ( $\geq 95\%$   $vVO_{2max}$  oder 90-95%  $HF_{max}$ ) / 4-5 Minuten aktive Pause ( $\leq 60-70\%$   $vVO_{2max}$ )

Bezugnehmend auf die Ergebnisse der vorliegenden Studie sind für Frauen eher ein HIIT mit mittlerer Belastungsdauer und für Männer mit langer Belastungsdauer zu empfehlen, da sie die physiologischen und anthropometrischen Geschlechtsunterschiede bestmöglich berücksichtigen. Allerdings ist eine pauschale Empfehlung ebenfalls wenig sinnvoll, da die verschiedenen Aspekte der Trainingszielstellung, der Sportart sowie der Leistungsfähigkeit mitberücksichtigt werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine geschlechtsspezifische Anpassung eines HIIT-Programms, welches die erhöhte Ermüdungsresistenz bei Frauen sowie die größere Fähigkeit, sich nach hochintensiven Intervallbelastungen metabolisch besser zu erholen, notwendig erscheinen lässt. Die Beachtung des Geschlechtsdimorphismus bei der Durchführung eines HIIT kann somit eine positive Beeinflussung von Trainingsleistung, Regeneration und Adaptation ermöglichen.

Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse bezüglich des Einflusses einer unterschiedlich ausgeprägten Ausdauerleistungsfähigkeit (KUADC 95. Perzentil vs. 70. Perzentil) auf die Belastungs- und Regenerationskinetik bei lokomotorischen Intervallbelastungen konnten nicht die weitreichenden Auswirkungen, wie sie im Vorfeld anhand der Studienlagen vermutet wurden, festgestellt werden. Dennoch zeigten sich vor allem in der Belastungskinetik bei lokomotorischen Intervallbelastungen, aber auch teilweise im Regenerationsverhalten innerhalb der interseriellen Pausen sowie der Nachbelastungsphase ausdauer-spezifische Unterschiede. In den Intervallbelastungen konnte nachgewiesen werden, dass die sehr gut ausdauertrainierten Sportler höhere Leistungen erbrachten und eine bessere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall aufwiesen. Der vermutete positive Einfluss einer besseren Ausdauerleistungsfähigkeit auf die Ermüdungsresistenz im Verlauf eines HIIT-Programms konnte dahingegen nicht nachgewiesen werden. Interaktionseffekte zwischen Pausenlänge x Ausdauerleistungsfähigkeit blieben ebenfalls aus. Es zeigte sich allerdings, dass mit zunehmender Pausenlänge die Leistungen anstiegen sowie die Ermüdung abnahm. Keinen Unterschied verursachte eine verlängerte Pausenzeit hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während einer Intervallbelastung.

Anhand dieser Erkenntnisse lässt sich schlussfolgern, dass Sportler mit einer besseren Ausdauerleistungsfähigkeit eine höhere Intensität sowie Dauer im

Belastungsintervall tolerieren können. Allerdings ist die Steuerung des HIIT-Programms ebenfalls von der Sportartengruppe, sowie des angestrebten Trainingsziels abhängig.

Bezugnehmend auf die Wiederherstellungsprozesse während der interseriellen Pausen und der Nachbelastungsphase konnte ein positiver Effekt der Ausdauerleistungsfähigkeit auf die Regeneration der Herzfrequenz, aber nicht auf die Laktatabbaurate ermittelt werden. Eine Ausdauerleistungsfähigkeit auf einem sehr guten Niveau macht sich vermutlich bei kurzen, interseriellen Pausenzeiten hauptsächlich bemerkbar. Das lässt den Schluss zu, dass besser trainierte Sportler eher ein HIIT mit kürzerer Pausendauer durchführen sollten, wohingegen für Athleten mit einem guten Ausdauerniveau Intervallbelastungen mit längeren Pausenzeiten sinnvoller erscheinen. Die Einbeziehung des Geschlechts, des Trainingsziels sowie der Sportart darf allerdings ebenfalls nicht außer Acht gelassen werden.

Die Ergebnisse stellen dahingegen auch eine Relevanz für die Trainingsgestaltung innerhalb der Spielsportarten dar. Aufgrund der intermittierenden Belastungsstruktur dieser Sportarten ist das HIIT ein wesentlicher Bestandteil im Trainingsprozess. Auch wenn die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die Ausdauerleistungsfähigkeit eines Sportlers auf dem Niveau eines 95. Perzentils im Vergleich zum 70. Perzentil zu keinem feststellbaren Einfluss auf den Leistungsabfall bei intermittierenden Sprintbelastungen führt, so wird dennoch ersichtlich, dass mit abnehmender Pausenlänge die Unterschiede zwischen beiden Gruppen im Leistungsabfall zunehmen. Dieser Aspekt zusätzlich zu der Tatsache, dass das Niveau der Ausdauerleistungsfähigkeit vor allem bei der Regeneration der Belastungsherzfrequenz bei kurzen Pausenzeiten einen Effekt hat, zeigt eine deutliche Notwendigkeit in der weiteren Trainierbarkeit der Ausdauer über ein gutes Niveau hinaus. Vor allem die Spielsportarten Handball, Fußball oder Basketball sind dabei von sehr kurzen Belastungs- und Entlastungsphasen geprägt. Daher erscheint vor allem in diesen Sportarten die Integration des Modell der sehr kurzen Belastungsdauer nach Buchheit & Laursen (2013) im Trainingsprozess als sinnvoll. Gängige HIIT-Programme sind laut den Autoren dabei beispielsweise im Profibereich für die Spielsportart Handball: zwei Serien a 20 x 10 Sekunden (110 % der maximalen Laufgeschwindigkeit des Stufentests) mit jeweils 20 Sekunden passiver Pausenzeit sowie für die Spielsportart Fußball: zwei Serien a 12-15 x 15 Sekunden (120 % der maximalen Laufgeschwindigkeit des Stufentests) mit jeweils 15 Sekunden passiver Pausenzeit.

Hinsichtlich des altersspezifischen Einflusses auf die Belastungs- und die Erholungskinetik nach lokomotorischen Intervallbelastungen zeigten die Ergebnisse, dass sich die altersbedingten, negativen Veränderungen des Organismus durch ein gutes Ausdauerleistungsniveau weitestgehend konterkarieren lassen. Vielmehr konnte nachgewiesen werden, dass vor allem die Ausprägung der Ausdauerleistungsfähigkeit den entscheidenden Faktor bei der Tolerierung von hochintensiven Intervallbelastungen darzustellen scheint.

Die Ausarbeitungen zeigten weiterhin, dass ein HIIT auch im höheren Alter ohne

weiteres in die Trainingsgestaltung integriert werden kann und es keiner pauschalen altersspezifischen Belastungs- und Regenerationssteuerung bei der Konzipierung eines HIIT bedarf. Die vorliegenden Ergebnisse haben deutlich aufgezeigt, dass ein höheres kalendarisches Alter keine negative Wirkung auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während hochintensiver Belastungen hat, sowie die Ermüdungsresistenz über den Verlauf eines HIIT-Programms negativ beeinflusst. Ein Interaktionseffekt Pausenlänge x Alter konnte ebenfalls nicht nachgewiesen werden. Lediglich ist, wie bereits schon bei dem Geschlecht und der Ausdauerleistungsfähigkeit ein positiver Einfluss einer zunehmenden Pausenlänge auf die Leistung und die Ermüdung während eines HIIT aufgezeigt worden.

In der Regenerationsfähigkeit innerhalb der interseriellen Pausenzeiten sowie der Nachbelastungsphase konnte ebenfalls kein negativer Alterseinfluss nachgewiesen werden. Der Fakt eines höheren Alters stellt dementsprechend keinen Grund für eine verschlechterte Wiederherstellung der Herzfrequenz oder einem verzögerten Laktatabbau nach hochintensiven Intervallbelastungen dar. Sowohl interseriell als auch im Anschluss an ein HIIT-Programm zeigten beide Altersklassen ein ähnliches Erholungsmuster. Diese Informationen sind dahingegen besonders wertvoll, da bisherige Studien zu den Schwerpunkten des HIIT zumeist an jungen Sportlern durchgeführt wurden und infolgedessen spekulativ Rückschlüsse auf Altersklassensportler gezogen worden sind. Durch diese Erkenntnis kann nun in der Trainingsplanung, mit größerer Sicherheit für Athleten verschiedener Altersklassen bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit nach demselben Belastungs- und Entlastungsmuster vorgegangen werden. Da sich auch die gesamte metabolische Last und die Ermüdung für beide Altersklassen jeweils innerhalb des Untersuchungsdesigns nicht grundlegend unterschiedlich darstellte, können die HIIT-Programme bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit der Athleten zur Erreichung derselben Trainingsziele für jüngere sowie ältere Athleten verwendet werden. Daher lassen die Ergebnisse die Schlussfolgerung zu, dass bei der Konzipierung eines HIIT-Programms das Geschlecht und die Ausdauerleistungsfähigkeit zwingend zu beachten sind, aber keine Altersspezifik notwendig ist. Die getroffenen Aussagen sind entsprechend dem Probandenkollektiv auf Sportler bis etwa zum 55. Lebensjahr zu beziehen.

Resümierend zeigt sich ein vielfältiger Ansatz für weitere Studien zur weiteren Klärung des Einflusses von Geschlechtsdimorphismus, Leistungsfähigkeit und Alter auf die Belastungs- und Erholungskinetik nach standardisierten, lokomotorischen Intervallbelastungen. Um zukünftig eine möglichst passgenaue Trainings- und Regenerationsplanung für unterschiedliche Sportarten und Trainingsgruppen gewährleisten zu können sowie den verantwortlichen Trainern noch weitere detaillierte Konzepte bezüglich der Belastungs- und Regenerationssteuerung während eines HIIT zu liefern, bedarf es der Durchführung ergänzender wissenschaftlicher Studien.

Folgende Forschungsansätze könnten dabei eine große Relevanz für die

Trainingswissenschaft darstellen. Eine Untersuchung bezüglich der geschlechtsspezifischen Identifikation geeigneter Belastungs- und Erholungsintervalle für unterschiedliche Trainingsziele würde unter anderem als sinnvoll erachtet werden. Besonders unter dem Aspekt, dass Frauen im Gegensatz zu Männern eher von kürzeren Pausen zwischen den Belastungsintervallen eines HIIT profitieren, kann eine Änderung in der Trainingsplanung für Frauen zu einem geeigneteren Training der Leistungsfähigkeit führen.

Darauf abzielend sind Untersuchungen mittels intermittierender Sprintbelastungen im Feld mit verschiedenen Intervallpausenzeiten sicher von Relevanz, um zu überprüfen inwiefern sich Ergebnisse mit den Erkenntnissen der vorliegenden Studie, in Bezug auf das Geschlecht, die Ausdauerleistungsfähigkeit und das Alter möglicherweise decken. Die laufbasierte Belastungsform weist eine noch höhere Relevanz für eine größere Anzahl an Sportlern und Sportarten auf. Vor allem für die leichtathletischen Laufdisziplinen sowie die Mannschaftssportarten sind laufbasierte HIIT-Programme von großer Wichtigkeit für die Trainingsgestaltung. Auch Buchheit & Laursen (2013b) hatten in ihrem Review bereits angemerkt, dass es weitere Studien benötigt, inwiefern unterschiedliche Bewegungsformen (Radfahren, Rudern, Laufen, Richtungswechsel) sowie unterschiedliche Belagsuntergründe einen Einfluss auf den glykolytischen Stoffwechsel des Sportlers während eines HIIT haben. Infolgedessen macht eine sportartspezifische Überprüfung der Belastungs- und Regenerationskinetik bei HIIT-Programmen in Abhängigkeit des Geschlechts und des Alters Sinn.

Da ein HIIT vor allem in den Mannschaftssportarten, dem Schwimmsport aber auch in der Leichtathletik im Trainingsalltag eine große Bedeutung aufweist sollte untersucht werden, in welchem Maß ein Geschlechtsdimorphismus sowie das Alter sportartenintern Auswirkungen auf die Belastungs- und Erholungskinetik hat und welche Konsequenzen und Trainingsempfehlungen aus den möglichen Erkenntnissen zu ziehen sind.

Darüber hinaus sollte untersucht werden, inwiefern die in dieser Untersuchung identifizierte Trainierbarkeit in einem noch höheren Alter, beispielsweise bis zum 75. Lebensjahr, erhalten bleibt. Vor allem durch eine immer weiter steigende Lebenserwartung sowie die bei Ausdauersportlern implementierte Verfolgung von Trainingsroutinen bis ins hohe Alter machen diesen Ansatz überprüfungswert. Das Ziel sollte es dabei sein, auch für diesen Altersbereich adäquate Empfehlungen treffen zu können, um eine mögliche Überforderung, einhergehend mit gesundheitlichen Risiken und eventuellen negativen Folgeerscheinungen, von Altersklassensportlern zu vermeiden.



## 8 Zusammenfassung

Ein hochintensives Intervalltraining (HIIT), welches durch wiederholende kurze (< 45 Sekunden) bis lange Belastungen (2-4 Minuten) mit hoher Intensität, unterbrochen von aktiven oder passiven Regenerationsphasen, charakterisiert ist, stellt eine bekannte und sehr zeiteffiziente Trainingsmethodik zur Verbesserung der kardiorespiratorischen und metabolischen Funktionen und letztlich zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit des Sportlers dar (Buchheit & Laursen, 2013a). Eine stetige Zunahme von nationalen und internationalen Publikationen in den vergangenen Jahren konnten die Wirksamkeit eines HIIT nicht nur im Leistungssport, sondern auch für den Breitensport-, den Präventions- und Rehabilitationsbereich sowie im Kinder- und Jugendsport nachweisen. Je nach trainingsmethodischer Zielstellung unterscheiden sich die HIIT-Programme hinsichtlich der Intensität und Dauer der Intervalle, der Anzahl an Wiederholungen und Serien, der Bewegungsausführung sowie den Erholungszeiten zwischen den Intervallbelastungen. Veränderungen der einzelnen Variablen, vor allem der Schlüsselfaktoren Intensität und Dauer der Intervall- und Regenerationsphasen führen zu unterschiedlichen akuten Effekten auf die physiologische Reaktion des Organismus (Buchheit & Laursen, 2013b; Hebestreit et al., 1993).

Auf Grundlage früherer Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass physiologische und anatomische Unterschiede bei Männern und Frauen zu Divergenzen in der Trainingsreaktion führen und somit auch die Erholungsphase nach dem Training durch unterschiedliche Prozesse gekennzeichnet ist (Hauswirth & Le Meur, 2011). Hinsichtlich intermittierender Belastungen wird daher vermutet, dass diese Unterschiede Auswirkungen auf die Belastungs- und die Erholungskinetik bei maximalen lokomotorischen Intervallbelastungen haben. Weiterhin scheint die Ausdauerleistungsfähigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Regenerationsfähigkeit zu haben. Eine Vielzahl an wissenschaftlichen Studien konnten zeigen, dass gut trainierte Ausdauersportler schneller regenerieren als untrainierte Personen (Darr et al., 1988; Short & Sedlock, 1997; Tomlin & Wenger, 2001). Allerdings sind der wesentliche Teil der Untersuchungen hauptsächlich anhand Probandenkollektiven mit einem großen Unterschied in der Ausdauerleistungsfähigkeit durchgeführt worden. Dahingegen ist nicht abschließend geklärt, ob diese Rückschlüsse ebenfalls auf die Belastungs- und Erholungskinetik bei hochintensiven Intervallbelastungen zwischen einem sehr guten und guten Ausdauerleistungsniveau gezogen werden können. Weiterhin deutet der derzeitige Forschungsstand darauf hin, dass Veränderungen der Skelettmuskulatur und verschiedener Funktionssysteme im Altersverlauf zu unterschiedlichen Reaktionen auf einen Belastungsreiz führen. So scheinen altersbedingte Funktionseinbußen zu verzögerten Wiederherstellungsprozessen und einer größeren Ermüdung nach intermittierenden Belastungen zu führen (Fell & Williams, 2008; Hebestreit et al., 1993).

Aufgrund dieser Erkenntnisse deutet die Studienlage darauf hin, dass der

Geschlechtsdimorphismus, die Leistungsfähigkeit und das Alter die Belastungs- und Regenerationskinetik nach maximalen, lokomotorischen Intervallbelastungen beeinflussen. Insgesamt zeigten aber die Recherchen, dass der geschlechts- und altersspezifische Einfluss auf den Erholungsverlauf bei trainierten jüngeren und älteren Sportlern noch unzureichend erforscht ist. In Folge dessen gibt es bei HIIT-Programmen im Leistungs- und Gesundheitssport keine geschlechtsspezifische Belastungs- bzw. Pausenzeitgestaltung sowie altersabhängige Empfehlungen. Aufgrund der inkonsistenten Sachlage zu der Thematik bestand die Notwendigkeit die Belastungs- und Erholungskinetik während und nach standardisierten lokomotorischen Intervallbelastungen mit unterschiedlichen Pausenzeiten in Abhängigkeit von Geschlecht, Leistungsfähigkeit und Alter näher zu untersuchen. Dabei sollten die gewonnenen Erkenntnisse Ansatzpunkte für die Trainingswissenschaft hinsichtlich der Belastungs- und Regenerationssteuerung im Leistungs-, Breiten- und Gesundheitssport liefern. Weiterhin sollte die Notwendigkeit von geschlechts- und altersspezifischen HIIT-Programmen geklärt werden sowie Trainingsempfehlungen für unterschiedliche Zielgruppen abgeleitet werden.

Insgesamt nahmen 48 Probanden (26 männlich/22 weiblich) zwischen 18 und 65 Jahren an der Studie teil. Jeder Proband absolvierte am ersten Untersuchungstag die Eingangsdiagnostik (u.a. Anamnesegespräch, Ruhe-EKG und Erhebung der anthropometrischen Daten) sowie einen  $VO_{2max}$ -Test auf dem Radergometer zur Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit. An den anschließenden drei Untersuchungstagen führten die Probanden in randomisierter Reihenfolge, nach standardisierter Erwärmung jeweils vier 30-sekündige WAnTs auf dem Radergometer mit unterschiedlichen aktiven Pausenzeiten (eine Minute, drei Minuten, zehn Minuten) sowie einer anschließenden 15-minütigen aktiven Nachbelastungsphase durch. Über den kompletten Testverlauf wurden die Herzfrequenz sowie die ventilatorischen Parameter, mittels Spirometrie aufgezeichnet. Zusätzlich erfolgte die Registrierung der maximalen und durchschnittlichen Leistung (in Watt) für jeden einzelnen WAnT und die Bestimmung der Laktat- und Glukosekonzentration zu ausgewählten Messzeiten. Weitere Parameter, wie das subjektiv wahrgenommene Anstrengungs- und Erholungsempfinden des Probanden sind ebenfalls dokumentiert worden. Anschließend ist das Datenmaterial analysiert worden. Dabei erfolgte eine deskriptive und statistische Auswertung u.a mittels T-Test für gepaarte Stichproben, 1-way ANOVA sowie mixed ANOVA. Die Berechnungen der Korrelationen erfolgten gruppenunabhängig bei ausschließlich metrischen Daten nach Pearson und bei ordinalskalierten bzw. metrischen und ordinalskalierten Daten nach Spearman. Das Signifikanzniveau wurde auf  $p < 0,05$  bzw.  $p < 0,001$  für hochsignifikante Unterschiede festgelegt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Männer bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit unabhängig von der Pausenlänge während lokomotorischer Intervallbelastungen höhere relative Leistungen im Vergleich zu Frauen erreicht haben. Weiterhin wiesen die männlichen Probanden eine größere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem

ermüdungsbedingten Leistungsabfall während der Intervallbelastungen auf. Im Unterschied dazu zeigte sich, dass Frauen einen geringeren Leistungsabfall über den Verlauf des HIIT-Programms aufwiesen. Geschlechtsunterschiede in der Wiederherstellung der Herzfrequenz sowie der Laktatabbaurate nach Intervallbelastungen konnten ebenfalls festgestellt werden. Männer wiesen eine bessere Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz auf, währenddessen die Frauen eine höhere Laktatabbaurate in der Nachbelastungsphase erreichten. Der Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf die physikalische Leistungen, die Ermüdung sowie verschiedene Wiederherstellungsprozesse zeigte sich dahingegen, dass sehr gut Ausdauertrainierte höhere Leistungen unabhängig von der Pausenzeit während lokomotorischer Intervallbelastungen verglichen mit gut ausdauertrainierten Probanden erbringen konnten. Ebenfalls führte ein höheres Niveau in der Ausdauerleistungsfähigkeit zu einer vergrößerten Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während der Intervallbelastung. Es zeigte sich aber, dass der Unterschied zwischen einer guten und sehr guten Ausdauerleistungsfähigkeit keinen Einfluss auf die Ermüdungsresistenz bezüglich unterschiedlicher Pausenlängen hatte. Anhand der Regenerationskinetik der Herzfrequenz sowie auf metabolischer Ebene konnte festgestellt werden, dass sehr gut Ausdauertrainierte vor allem bei kurzen Pausenzeiten eine schnellere Wiederherstellung der Herzfrequenz erzielten. In der Laktatakkumulation sowie der Laktatabbaurate konnte unabhängig von der Pausenlänge kein Unterschied hinsichtlich der Ausdauerleistungsfähigkeit nachgewiesen werden. Ein negativer altersbedingter Einfluss auf die Belastungs- und Erholungskinetik konnte bei gleicher Ausdauerleistungsfähigkeit im Wesentlichen nicht aufgezeigt werden. Die jungen Sportler erreichten in Bezug auf unterschiedliche Pausenlängen zwischen den Intervallbelastungen höhere relative Leistungen. Allerdings konnte ein Alterseinfluss nur bei der maximalen Leistung nachgewiesen werden. Weiterhin zeigten Altersklassensportler keine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber einem ermüdungsbedingten Leistungsabfall während einer Intervallbelastung, noch hatte das Alter eine Wirkung auf die Ermüdungsresistenz über den Verlauf eines HIIT-Programms. In der Regenerationsfähigkeit der Belastungsherzfrequenz wiesen die jungen Athleten tendenziell vor allem bei kurzen Pausenzeiten eine höhere Wiederherstellungsrate auf, welche allerdings nicht statistisch nachgewiesen werden konnte. Auf metabolischer Ebene zeigte sich kein Altersunterschied in der Eliminierung der Laktatakkumulation.

Auf Grundlage der Ergebnisse kann daher geschlussfolgert werden, dass ein Geschlechtsdimorphismus in der Belastungs- und Erholungskinetik bei maximalen lokomotorischen Intervallbelastungen festzustellen ist. Die im Vorfeld vermuteten weitreichenden Auswirkungen einer sehr guten Ausdauerleistungsfähigkeit verglichen mit einem guten Niveau auf die Belastungs- und Erholungskinetik konnten nicht nachgewiesen werden. Dennoch zeigten sich vor allem in der Belastungskinetik während lokomotorischer Intervallbelastungen, aber auch teils im Regenerationsverhalten ausdauerspezifische Unterschiede. Des Weiteren konnte

durch die Untersuchung aufgezeigt werden, dass eine gute Trainierbarkeit im Alter möglich ist, was wiederum die altersbedingten Veränderungen und deren Einfluss auf das Belastungs- und Erholungsverhalten konterkarieren kann.

Zusammenfassend lassen die Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchung die Schlussfolgerungen zu, dass geschlechtsspezifische Vorgaben bezüglich der Intensität und Dauer der Intervall- und Pausenbelastungen sowie der Wiederholungszahl für ein HIIT-Programm notwendig erscheinen. Eine altersspezifische Unterscheidung des HIIT für junge Athleten und Altersklassensportler ist dahingegen nicht erforderlich. Der entscheidende Faktor diesbezüglich ist vermutlich das Geschlecht sowie das Niveau der Ausdauerleistungsfähigkeit.

## Literaturverzeichnis

- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W. J., & Häkkinen, K. (2003). Muscle hypertrophy, hormonal adaptations and strength development during strength training in strength-trained and untrained men. *European Journal of Applied Physiology*, 89(6), 555–563. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0833-3>
- Albert, W., Wrigley, A., McLean, R., & Sleivert, G. (2006). Sex differences in the rate of fatigue development and recovery. *Dynamic Medicine*, 5(1), 2. <https://doi.org/10.1186/1476-5918-5-2>
- Allman, B. L., & Rice, C. L. (2001). Incomplete recovery of voluntary isometric force after fatigue is not affected by old age. *Muscle & Nerve*, 24(9), 1156–1167. <https://doi.org/10.1002/mus.1127>
- Amundsen, B. H., Rognmo, Ø., Hatlen-Rebhan, G., & Slørdahl, S. A. (2008). High-intensity aerobic exercise improves diastolic function in coronary artery disease. *Scandinavian Cardiovascular Journal*, 42(2), 110–117. <https://doi.org/10.1080/14017430701744477>
- Arena, R., Arrowood, J. A., Fei, D., Shelar, S., Helm, S., & Kraft, K. A. (2009). The influence of sex on the relationship between heart rate recovery and other cardiovascular risk factors in apparently healthy subjects: Aortic stiffness and heart rate recovery. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(2), 291–297. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00883.x>
- Arslan, C. (2005). Relationship Between the 30-Second Wingate Test and Characteristics of Isometric and Explosive Leg Strength in Young Subjects. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(3), 658. <https://doi.org/10.1519/14533.1>
- Astorino, T. A., Allen, R. P., Roberson, D. W., Jurancich, M., Lewis, R., McCarthy, K., & Trost, E. (2011). Adaptations to high-intensity training are independent of gender. *European Journal of Applied Physiology*, 111(7), 1279–1286. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1741-y>
- Astrand, I. (1960). Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiologica Scandinavica. Supplementum*, 49(169), 1–92.
- Astrand, P.-O. (1993). Ausdauer-sport. In R. J. Shepard & P.-O. Astrand (Hrsg.), *Ausdauer im Sport: Eine Veröffentlichung des IOC in Zusammenarbeit mit der FIMS* (S. 22–29). Dt. Ärzte-Verl.
- Ayalon, A., Inbar, O., & Bar-Or, O. (1974). Relationships Among measurements of explosive strength and anaerobic power. In R. C. Nelson & C. A. Morehouse (Hrsg.), *Biomechanics IV* (S. 572–577). Macmillan Education UK. [https://doi.org/10.1007/978-1-349-02612-8\\_85](https://doi.org/10.1007/978-1-349-02612-8_85)
- Baar, K. (2009). The signaling underlying FITness. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, 34(3), 411–419. <https://doi.org/10.1139/H09-035>
- Bangsbo, J., Iaia, F. M., & Krstrup, P. (2008). The Yo-Yo Intermittent Recovery Test: A Useful Tool for Evaluation of Physical Performance in Intermittent Sports. *Sports Medicine*, 38(1), 37–51. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838010-00004>

- Bar-Or, O. (1987). The Wingate Anaerobic Test: An Update on Methodology, Reliability and Validity. *Sports Medicine*, 4(6), 381–394.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-198704060-00001>
- Bassett, D. R., Merrill, P. W., Nagle, F. J., Agre, J. C., & Sampedro, R. (1991). Rate of decline in blood lactate after cycling exercise in endurance-trained and -untrained subjects. *Journal of Applied Physiology*, 70(4), 1816–1820.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1991.70.4.1816>
- Bemben, M. G., Massey, B. H., Bemben, D. A., Misner, J. E., & Boileau, R. A. (1996). Isometric intermittent endurance of four muscle groups in men aged 20-74 yr. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(1), 145–154.  
<https://doi.org/10.1097/00005768-199601000-00026>
- Ben-Ari, E., Inbar, O., & Bar-Or, O. (1978). The anaerobic capacity and maximal anaerobic power of 30-40 year old men and women. *Proceedings of the 5th international symposium of kinanthropometry*, 427–433.
- Beneke, R., Hütler, M., Jung, M., & Leithäuser, R. M. (2005). Modeling the blood lactate kinetics at maximal short-term exercise conditions in children, adolescents, and adults. *Journal of Applied Physiology*, 99(2), 499–504.  
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00062.2005>
- Bentley, D. J., Newell, J., & Bishop, D. (2007). Incremental exercise test design and analysis: Implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(7), 575–586.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200737070-00002>
- Bergman, B. C., Wolfel, E. E., Butterfield, G. E., Lopaschuk, G. D., Casazza, G. A., Horning, M. A., & Brooks, G. A. (1999). Active muscle and whole body lactate kinetics after endurance training in men. *Journal of Applied Physiology*, 87(5), 1684–1696.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.5.1684>
- Bieuzen, F., Hausswirth, C., Louis, J., & Brisswalter, J. (2010). Age-related changes in neuromuscular function and performance following a high-intensity intermittent task in endurance-trained men. *Gerontology*, 56(1), 66–72.  
<https://doi.org/10.1159/000262286>
- Billat, V. L., Flechet, B., Petit, B., Muriaux, G., & Koralsztejn, J. P. (1999). Interval training at VO<sub>2</sub>max: Effects on aerobic performance and overtraining markers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(1), 156–163.  
<https://doi.org/10.1097/00005768-199901000-00024>
- Billat, V., Sirvent, P., Lepretre, P.-M., & Koralsztejn, J. P. (2004). Training effect on performance, substrate balance and blood lactate concentration at maximal lactate steady state in master endurance-runners. *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology*, 447(6), 875–883.  
<https://doi.org/10.1007/s00424-003-1215-8>
- Billaut, F., Basset, F. A., Giacomoni, M., Lemaître, F., Tricot, V., & Falgairette, G. (2006). Effect of high-intensity intermittent cycling sprints on neuromuscular activity. *International Journal of Sports Medicine*, 27(1), 25–30.  
<https://doi.org/10.1055/s-2005-837488>
- Billaut, François, & Bishop, D. (2009). Muscle Fatigue in Males and Females during Multiple-Sprint Exercise. *Sports Medicine*, 39(4), 257–278.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200939040-00001>

- Bishop, D., Lawrence, S., & Spencer, M. (2003). Predictors of repeated-sprint ability in elite female hockey players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(2), 199–209.  
[https://doi.org/10.1016/s1440-2440\(03\)80255-4](https://doi.org/10.1016/s1440-2440(03)80255-4)
- Bishop, D., & Spencer, M. (2004). Determinants of repeated-sprint ability in well-trained team-sport athletes and endurance-trained athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 44(1), 1–7.
- Bishop, David, & Edge, J. (2006). Determinants of repeated-sprint ability in females matched for single-sprint performance. *European Journal of Applied Physiology*, 97(4), 373–379.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-006-0182-0>
- Bishop, David, Edge, J., Davis, C., & Goodman, C. (2004). Induced metabolic alkalosis affects muscle metabolism and repeated-sprint ability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(5), 807–813.  
<https://doi.org/10.1249/01.mss.0000126392.20025.17>
- Blomqvist, C. G., & Saltin, B. (1983). Cardiovascular adaptations to physical training. *Annual Review of Physiology*, 45, 169–189.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.ph.45.030183.001125>
- Bonen, A. (2000). Lactate transporters (MCT proteins) in heart and skeletal muscles. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(4), 778–789.  
<https://doi.org/10.1097/00005768-200004000-00010>
- Bonen, A., & Belcastro, A. N. (1976). Comparison of self-selected recovery methods on lactic acid removal rates. *Medicine and Science in Sports*, 8(3), 176–178.  
<https://doi.org/10.1249/00005768-197600830-00008>
- Bonen, A., Miskovic, D., Tonouchi, M., Lemieux, K., Wilson, M. C., Marette, A., & Halestrap, A. P. (2000). Abundance and subcellular distribution of MCT1 and MCT4 in heart and fast-twitch skeletal muscles. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 278(6), E1067-1077.  
<https://doi.org/10.1152/ajpendo.2000.278.6.E1067>
- Borg, G. (2004). Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. *Deutsches Ärzteblatt*, 101(15), 1016–1021.
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(5), 377–381.
- Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise: Measurements and implications for monitoring training status. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 38(8), 633–646.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200838080-00002>
- Bortz, J., & Schuster, C. (2016). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler: Extras online* (Limitierte Sonderausgabe, 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer.
- Bottinelli, R., & Reggiani, C. (2000). Human skeletal muscle fibres: Molecular and functional diversity. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 73(2–4), 195–262.  
[https://doi.org/10.1016/s0079-6107\(00\)00006-7](https://doi.org/10.1016/s0079-6107(00)00006-7)
- Boyd, A. E., Giamber, S. R., Mager, M., & Lebovitz, H. E. (1974). Lactate inhibition of lipolysis in exercising man. *Metabolism: Clinical and Experimental*, 23(6), 531–542.  
[https://doi.org/10.1016/0026-0495\(74\)90081-x](https://doi.org/10.1016/0026-0495(74)90081-x)

- Brooks, G. A. (2009). Cell-cell and intracellular lactate shuttles. *The Journal of Physiology*, 587(Pt 23), 5591–5600.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.178350>
- Buchheit, M., Duché, P., Laursen, P. B., & Ratel, S. (2010). Postexercise heart rate recovery in children: Relationship with power output, blood pH, and lactate. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 35(2), 142–150.  
<https://doi.org/10.1139/H09-140>
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013a). High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle: Part I: Cardiopulmonary Emphasis. *Sports Medicine*, 43(5), 313–338.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-013-0029-x>
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013b). High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle: Part II: Anaerobic Energy, Neuromuscular Load and Practical Applications. *Sports Medicine*, 43(10), 927–954.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-013-0066-5>
- Caputo, F., & Denadai, B. S. (2004). Effects of aerobic endurance training status and specificity on oxygen uptake kinetics during maximal exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 93(1–2), 87–95.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-004-1169-3>
- Carnethon, M. R., Jacobs, D. R., Sidney, S., Sternfeld, B., Gidding, S. S., Shoushtari, C., & Liu, K. (2005). A longitudinal study of physical activity and heart rate recovery: CARDIA, 1987-1993. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(4), 606–612.  
<https://doi.org/10.1249/01.mss.0000158190.56061.32>
- Cartee, G. D. (1994). Aging skeletal muscle: Response to exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 22, 91–120.
- Carter, H., Jones, A. M., & Doust, J. H. (1999). Effect of 6 weeks of endurance training on the lactate minimum speed. *Journal of Sports Sciences*, 17(12), 957–967.  
<https://doi.org/10.1080/026404199365353>
- Chamari, K., Ahmaidi, S., Ayoub, J., Merzouk, A., Laparidis, C., Choquet, D., Mercier, J., & Prefaut, C. (2000). Effects of Aging on Cardiorespiratory Responses to Brief and Intense Intermittent Exercise in Endurance-Trained Athletes. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(11), B537–B544.  
<https://doi.org/10.1093/gerona/55.11.B537>
- Chapman, A. R., Vicenzino, B., Blanch, P., & Hodges, P. W. (2008). Patterns of leg muscle recruitment vary between novice and highly trained cyclists. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(3), 359–371.  
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2005.12.007>
- Chevront, S. N., Carter, R., Deruisseau, K. C., & Moffatt, R. J. (2005). Running performance differences between men and women: an update. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(12), 1017–1024.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200535120-00002>
- Coffey, V. G., & Hawley, J. A. (2007). The molecular bases of training adaptation. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(9), 737–763.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200737090-00001>



- Coggan, A. R., Abduljalil, A. M., Swanson, S. C., Earle, M. S., Farris, J. W., Mendenhall, L. A., & Robitaille, P. M. (1993). Muscle metabolism during exercise in young and older untrained and endurance-trained men. *Journal of Applied Physiology*, *75*(5), 2125–2133. <https://doi.org/10.1152/jappl.1993.75.5.2125>
- Coggan, A. R., Spina, R. J., Rogers, M. A., King, D. S., Brown, M., Nemeth, P. M., & Holloszy, J. O. (1990). Histochemical and enzymatic characteristics of skeletal muscle in master athletes. *Journal of Applied Physiology*, *68*(5), 1896–1901. <https://doi.org/10.1152/jappl.1990.68.5.1896>
- Corte de Araujo, A. C., Roschel, H., Picanço, A. R., do Prado, D. M. L., Villares, S. M. F., de Sá Pinto, A. L., & Gualano, B. (2012). Similar Health Benefits of Endurance and High-Intensity Interval Training in Obese Children. *PLoS ONE*, *7*(8), e42747. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042747>
- Costigan, S. A., Eather, N., Plotnikoff, R. C., Taaffe, D. R., & Lubans, D. R. (2015). High-intensity interval training for improving health-related fitness in adolescents: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *49*(19), 1253–1261. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094490>
- Costill, D. L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G., & Saltin, B. (1976). Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *Journal of Applied Physiology*, *40*(2), 149–154. <https://doi.org/10.1152/jappl.1976.40.2.149>
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., Abraham, L. D., & Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *23*(1), 93–107.
- Daffner, F. & Royal College of Physicians of Edinburgh. (2016). *Das Wachstum des Menschen—Anthropologische Studie*. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-2019050900345847158501>
- Darr, K. C., Bassett, D. R., Morgan, B. J., & Thomas, D. P. (1988). Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. *The American Journal of Physiology*, *254*(2 Pt 2), H340-343. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1988.254.2.H340>
- de Mendonca, G. V., Teodósio, C., & Bruno, P. M. (2017). Sexual dimorphism in heart rate recovery from peak exercise. *European Journal of Applied Physiology*, *117*(7), 1373–1381. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3627-8>
- Demarle, A. P., Slawinski, J. J., Laffite, L. P., Bocquet, V. G., Koralsztein, J. P., & Billat, V. L. (2001). Decrease of O<sub>2</sub> deficit is a potential factor in increased time to exhaustion after specific endurance training. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *90*(3), 947–953. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.90.3.947>
- Deschenes, M. R., Hillard, M. N., Wilson, J. A., Dubina, M. I., & Eason, M. K. (2006). Effects of gender on physiological responses during submaximal exercise and recovery. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *38*(7), 1304–1310. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000227316.93351.56>
- Diehl, J. M., Staufenbiel, T., Diehl, J. M., & Staufenbiel, T. (2002). *Statistik mit SPSS: Version 10 + 11* (1. Aufl). Klotz.
- Dr. Müller Gerätebau GmbH. (2010). *Gebrauchsanweisung SUPER GL ambulance*.

- Du, N., Bai, S., Oguri, K., Kato, Y., Matsumoto, I., Kawase, H., & Matsuoka, T. (2005). Heart rate recovery after exercise and neural regulation of heart rate variability in 30-40 year old female marathon runners. *Journal of Sports Science & Medicine*, 4(1), 9–17.
- Easthope, C. S., Hausswirth, C., Louis, J., Lepers, R., Vercruyssen, F., & Brisswalter, J. (2010). Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 110(6), 1107–1116. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1597-1>
- Eklom, B. (1968). Effect of physical training on oxygen transport system in man. *Acta Physiologica Scandinavica. Supplementum*, 328, 1–45.
- Eliakim, A., Nemet, D., Most, G., Rakover, N., Pantanowitz, M., & Meckel, Y. (2014). Effect of Gender on the GH-IGF-I Response to Anaerobic Exercise in Young Adults: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(12), 3411–3415. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000605>
- Elliott-Sale, K. J., McNulty, K. L., Ansdell, P., Goodall, S., Hicks, K. M., Thomas, K., Swinton, P. A., & Dolan, E. (2020). The Effects of Oral Contraceptives on Exercise Performance in Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 50(10), 1785–1812. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01317-5>
- Engel, F. A., & Sperlich, B. (2014). (Hoch-)intensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen im Nachwuchsleistungssport. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 164(11–12), 228–238. <https://doi.org/10.1007/s10354-014-0277-x>
- Engel, F. A., Wagner, M., Roth, A., Scharenberg, S., Bossmann, T., Woll, A., & Sperlich, B. (2018). Hochintensives Intervalltraining im Sportunterricht. *German Journal of Exercise and Sport Research*, 48(1), 120–128. <https://doi.org/10.1007/s12662-018-0492-5>
- Esbjörnsson, M., Norman, B., Suchdev, S., Viru, M., Lindhgren, A., & Jansson, E. (2009). Greater growth hormone and insulin response in women than in men during repeated bouts of sprint exercise. *Acta Physiologica*, 197(2), 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2009.01994.x>
- Esbjörnsson, M., Sylvén, C., Holm, I., & Jansson, E. (1993). Fast Twitch Fibres May Predict Anaerobic Performance in Both Females and Males. *International Journal of Sports Medicine*, 14(05), 257–263. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021174>
- Esbjörnsson-Liljedahl, M., Bodin, K., & Jansson, E. (2002). Smaller muscle ATP reduction in women than in men by repeated bouts of sprint exercise. *MUSCLE METABOLISM*, 93, 9.
- Esbjörnsson-Liljedahl, M., Sundberg, C. J., Norman, B., & Jansson, E. (1999). Metabolic response in type I and type II muscle fibers during a 30-s cycle sprint in men and women. *Journal of Applied Physiology*, 87(4), 1326–1332. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.4.1326>
- Evans, B. W., & Cureton, K. J. (1983). Effect of physical conditioning on blood lactate disappearance after supramaximal exercise. *British Journal of Sports Medicine*, 17(1), 40–45. <https://doi.org/10.1136/bjism.17.1.40>
- Evans, J. A., & Quinney, H. A. (1981). Determination of resistance settings for anaerobic power testing. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences. Journal Canadien Des Sciences Appliquees Au Sport*, 6(2), 53–56.

- Evans, S. L., Davy, K. P., Stevenson, E. T., & Seals, D. R. (1995). Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. *Journal of Applied Physiology*, *78*(5), 1931–1941.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1995.78.5.1931>
- Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: How valid are they? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *39*(6), 469–490.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003>
- Faulkner, J. A., Davis, C. S., Mendias, C. L., & Brooks, S. V. (2008). The Aging of Elite Male Athletes: Age-Related Changes in Performance and Skeletal Muscle Structure and Function: *Clinical Journal of Sport Medicine*, *18*(6), 501–507.  
<https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3181845f1c>
- Fell, J., Haseler, L., Gaffney, P., Reaburn, P., & Harrison, G. (2006). Performance during consecutive days of laboratory time-trials in young and veteran cyclists. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *46*(3), 395–402.
- Fell, J., Reaburn, P., & Harrison, G. J. (2008). Altered perception and report of fatigue and recovery in veteran athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *48*(2), 272–277.
- Fell, James, & Williams, A. D. (2008). The Effect of Aging on Skeletal-Muscle Recovery from Exercise: Possible Implications for Aging Athletes. *Journal of Aging and Physical Activity*, *16*(1), 97–115.  
<https://doi.org/10.1123/japa.16.1.97>
- Ferrauti, A. (Hrsg.). (2020). *Trainingswissenschaft für die Sportpraxis: Lehrbuch für Studium, Ausbildung und Unterricht im Sport*. Springer Berlin Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58227-5>
- Finkelstein, J. S., Lee, H., Burnett-Bowie, S.-A. M., Pallais, J. C., Yu, E. W., Borges, L. F., Jones, B. F., Barry, C. V., Wulczyn, K. E., Thomas, B. J., & Leder, B. Z. (2013). Gonadal steroids and body composition, strength, and sexual function in men. *The New England Journal of Medicine*, *369*(11), 1011–1022.  
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa1206168>
- Fleg, J. L., Schulman, S., O'Connor, F., Becker, L. C., Gerstenblith, G., Clulow, J. F., Renlund, D. G., & Lakatta, E. G. (1994). Effects of acute beta-adrenergic receptor blockade on age-associated changes in cardiovascular performance during dynamic exercise. *Circulation*, *90*(5), 2333–2341.  
<https://doi.org/10.1161/01.cir.90.5.2333>
- Flück, M., & Hoppeler, H. (2003). Molecular basis of skeletal muscle plasticity—From gene to form and function. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, *146*, 159–216.  
<https://doi.org/10.1007/s10254-002-0004-7>
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The adaptations to strength training: Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *37*(2), 145–168.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200737020-00004>
- Fox, S. M., Naughton, J. P., & Haskell, W. L. (1971). Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Annals of Clinical Research*, *3*(6), 404–432.
- Föhrenbach, R. (1986). Leistungsdiagnostik, Trainingsanalyse und -steuerung bei Läuferinnen und Läufern verschiedener Laufdisziplinen. Hartung-Gorre, Konstanz (Dissertation).

- Franssen, P. ML., & Imholz, B. PM. (2010). Evaluation of the Mobil-O-Graph new generation ABPM device using the ESH criteria: *Blood Pressure Monitoring*, 15(4), 229–231.  
<https://doi.org/10.1097/MBP.0b013e328339be38>
- Freund, H., Lonsdorfer, J., Oyono-Enguélé, S., Lonsdorfer, A., & Bogui, P. (1992). Lactate exchange and removal abilities in sickle cell patients and in untrained and trained healthy humans. *Journal of Applied Physiology*, 73(6), 2580–2587.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1992.73.6.2580>
- Friedmann, B., & Kindermann, W. (1989). Energy metabolism and regulatory hormones in women and men during endurance exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 59(1–2), 1–9.  
<https://doi.org/10.1007/BF02396572>
- Froese, E. A., & Houston, M. E. (1987). Performance during the Wingate anaerobic test and muscle morphology in males and females. *International Journal of Sports Medicine*, 8(1), 35–39.  
<https://doi.org/10.1055/s-2008-1025637>
- Gekle, M., Wischmeyer, E., Grunder, S., Petersen, M., & Schwab, A. (2015). *Taschenlehrbuch Physiologie* (2., überarbeitete Auflage). Georg Thieme Verlag.
- Gibala, M. J. (2007). High-intensity interval training: A time-efficient strategy for health promotion? *Current Sports Medicine Reports*, 6(4), 211–213.
- Gibala, M. J., Gillen, J. B., & Percival, M. E. (2014). Physiological and Health-Related Adaptations to Low-Volume Interval Training: Influences of Nutrition and Sex. *Sports Medicine*, 44(S2), 127–137. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0259-6>
- Gibala, M. J., & Little, J. P. (2010). Just HIT it! A time-efficient exercise strategy to improve muscle insulin sensitivity. *The Journal of Physiology*, 588(Pt 18), 3341–3342.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.196303>
- Gillen, J. B., & Gibala, M. J. (2014). Is high-intensity interval training a time-efficient exercise strategy to improve health and fitness? *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 39(3), 409–412.  
<https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0187>
- Girden, E. (1992). *ANOVA*. SAGE Publications, Inc.  
<https://doi.org/10.4135/9781412983419>
- Glenmark, B., Hedberg, G., & Jansson, E. (1992). Changes in muscle fibre type from adolescence to adulthood in women and men. *Acta Physiologica Scandinavica*, 146(2), 251–259.  
<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1992.tb09414.x>
- Gratas-Delamarche, A., Le Cam, R., Delamarche, P., Monnier, M., & Koubi, H. (1994). Lactate and catecholamine responses in male and female sprinters during a Wingate test. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68(4), 362–366.  
<https://doi.org/10.1007/BF00571458>
- Graves, R. S., Mahnken, J. D., Perea, R. D., Billinger, S. A., & Vidoni, E. D. (2015). Modeling Percentile Rank of Cardiorespiratory Fitness Across the Lifespan. *Cardiopulmonary Physical Therapy Journal*, 26(4), 108–113.
- Greer, F., McLean, C., & Graham, T. E. (1998). Caffeine, performance, and metabolism during repeated Wingate exercise tests. *Journal of Applied Physiology*, 85(4), 1502–1508.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1998.85.4.1502>

- Hagberg, J. M., Allen, W. K., Seals, D. R., Hurley, B. F., Ehsani, A. A., & Holloszy, J. O. (1985). A hemodynamic comparison of young and older endurance athletes during exercise. *Journal of Applied Physiology*, *58*(6), 2041–2046.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1985.58.6.2041>
- Hagberg, J. M., Seals, D. R., Yerg, J. E., Gavin, J., Gingerich, R., Premachandra, B., & Holloszy, J. O. (1988). Metabolic responses to exercise in young and older athletes and sedentary men. *Journal of Applied Physiology*, *65*(2), 900–908.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1988.65.2.900>
- Haizlip, K. M., Harrison, B. C., & Leinwand, L. A. (2015). Sex-based differences in skeletal muscle kinetics and fiber-type composition. *Physiology*, *30*(1), 30–39.  
<https://doi.org/10.1152/physiol.00024.2014>
- Häkkinen, K., & Keskinen, K. L. (1989). Muscle cross-sectional area and voluntary force production characteristics in elite strength- and endurance-trained athletes and sprinters. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *59*(3), 215–220.  
<https://doi.org/10.1007/BF02386190>
- Häkkinen, K., Pakarinen, A., Kraemer, W. J., Newton, R. U., & Alen, M. (2000). Basal concentrations and acute responses of serum hormones and strength development during heavy resistance training in middle-aged and elderly men and women. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, *55*(2), B95–105.  
<https://doi.org/10.1093/gerona/55.2.b95>
- Hall, J. L., Mazzeo, R. S., Podolin, D. A., Cartee, G. D., & Stanley, W. C. (1994). Exercise training does not compensate for age-related decrease in myocardial GLUT-4 content. *Journal of Applied Physiology*, *76*(1), 328–332.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1994.76.1.328>
- Hamilton, A. L., Nevill, M. E., Brooks, S., & Williams, C. (1991). Physiological responses to maximal intermittent exercise: Differences between endurance-trained runners and games players. *Journal of Sports Sciences*, *9*(4), 371–382.  
<https://doi.org/10.1080/02640419108729897>
- Harber, M. P., Konopka, A. R., Douglass, M. D., Minchev, K., Kaminsky, L. A., Trappe, T. A., & Trappe, S. (2009). Aerobic exercise training improves whole muscle and single myofiber size and function in older women. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *297*(5), R1452–R1459.  
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.00354.2009>
- Hartmann, B., Klußmann, A., & Serafin, P. (2018). Physische Leistungsfähigkeit, Alter und Geschlecht – Zur Beurteilung gesundheitlicher Risiken bei körperlich belastenden Tätigkeiten: Teil 3: Daten zur kardiopulmonalen und energetischen Leistungsfähigkeit sowie gemeinsame Schlussfolgerungen. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, *68*(6), 325–333.  
<https://doi.org/10.1007/s40664-018-0288-3>
- Hauswirth, C., & Le Meur, Y. (2011). Physiological and nutritional aspects of post-exercise recovery: Specific recommendations for female athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *41*(10), 861–882.  
<https://doi.org/10.2165/11593180-000000000-00000>
- Hawkins, S. A., & Wiswell, R. A. (2003). Rate and Mechanism of Maximal Oxygen Consumption Decline with Aging: Implications for Exercise Training. *Sports Medicine*, *33*(12), 877–888.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200333120-00002>

- Hawley, J. A., & Noakes, T. D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 65(1), 79–83.  
<https://doi.org/10.1007/BF01466278>
- Hawley, John A. (2002). Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training. *Clinical and Experimental Pharmacology & Physiology*, 29(3), 218–222.  
<https://doi.org/10.1046/j.1440-1681.2002.03623.x>
- Hazell, T. J., MacPherson, R. E. K., Gravelle, B. M. R., & Lemon, P. W. R. (2010). 10 or 30-s sprint interval training bouts enhance both aerobic and anaerobic performance. *European Journal of Applied Physiology*, 110(1), 153–160.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-010-1474-y>
- Hebestreit, H., Mimura, K., & Bar-Or, O. (1993). Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: Comparing boys and men. *Journal of Applied Physiology*, 74(6), 2875–2880.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1993.74.6.2875>
- Heck, H. (2006). Muskuläre Energiestoffwechsel und sportliche Aktivität. *Blickpunkt der Mann*, 4(4), 23–28.
- Heck, Hermann. (1990). *Laktat in der Leistungsdiagnostik*. Hofmann.
- Hegner, J. (2015). *Training fundiert erklärt: Handbuch der Trainingslehre* (6. Auflage). Ingold Verlag.
- Heinicke, K., Wolfarth, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., Friedmann, B., & Schmidt, W. (2001). Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *International Journal of Sports Medicine*, 22(7), 504–512.  
<https://doi.org/10.1055/s-2001-17613>
- Heise, G., Shinohara, M., & Binks, L. (2008). Biarticular Leg Muscles and Links to Running Economy. *International Journal of Sports Medicine*, 29(08), 688–691.  
<https://doi.org/10.1055/s-2007-989372>
- Helgerud, J., Engen, L. C., Wisloff, U., & Hoff, J. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(11), 1925–1931.  
<https://doi.org/10.1097/00005768-200111000-00019>
- Helgerud, Jan, Høydal, K., Wang, E., Karlsen, T., Berg, P., Bjerkaas, M., Simonsen, T., Helgesen, C., Hjorth, N., Bach, R., & Hoff, J. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO<sub>2</sub>max more than moderate training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(4), 665–671.  
<https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180304570>
- Henriksson, J. (1993). Zellulärer Stoffwechsel und Ausdauer. In R. J. Shepard & P.-O. Astrand (Hrsg.), *Ausdauer im Sport: Eine Veröffentlichung des IOC in Zusammenarbeit mit der FIMS* (S. 59–72). Dt. Ärzte-Verl.
- Hicks, A. L., Kent-Braun, J., & Ditor, D. S. (2001). Sex differences in human skeletal muscle fatigue. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 29(3), 109–112.  
<https://doi.org/10.1097/00003677-200107000-00004>
- Hickson, R. C., Bomze, H. A., & Holloszy, J. O. (1977). Linear increase in aerobic power induced by a strenuous program of endurance exercise. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 42(3), 372–376.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1977.42.3.372>

- Hickson, R. C., Hagberg, J. M., Ehsani, A. A., & Holloszy, J. O. (1981). Time course of the adaptive responses of aerobic power and heart rate to training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 13(1), 17–20.
- Hollmann, W. (1977). Lungenfunktion, Atmung und Gasstoffwechsel im Sport. In Wildor Hollmann, P.-O. Åstrand, C. Bouchard, M. Donike, A. Drews, H. Groh, M. J. Halhuber, G. Haralambie, H. Hofmann, J. Karlsson, J. Keul, J. Klauck, H. Mellerowicz, H. P. Milz, L. Röcker, R. Rost, R. Rujbr, B. Saltin, J. Schmidt, ... C. H. Wyndham (Hrsg.), *Zentrale Themen der Sportmedizin* (S. 67–91). Springer Berlin Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-00622-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-00622-1_5)
- Hollmann, W., Tagarakis, C., & Platen, P. (2002). Die Leistungsfähigkeit der Frau: Biologische und leistungsphysiologische Aspekte. In J. Brachmann & H. J. Medau (Hrsg.), *Die koronare Herzkrankheit der Frau* (S. 7–18). Steinkopff.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-57534-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-57534-1_2)
- Hollmann, Wildor, Hettinger, T., & Strüder, H. K. (2000). *Sportmedizin: Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin; mit 101 Tabellen* (4., völlig neu bearb. und erw. Aufl). Schattauer.
- Hollmann, Wildor, Strüder, H. K., & Diehl, J. (2009). *Sportmedizin: Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin* (5., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Schattauer.
- Holloszy, J. O. (1967). Biochemical adaptations in muscle. Effects of exercise on mitochondrial oxygen uptake and respiratory enzyme activity in skeletal muscle. *The Journal of Biological Chemistry*, 242(9), 2278–2282.
- Holloszy, J. O., & Coyle, E. F. (1984). Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 56(4), 831–838.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1984.56.4.831>
- Hottenrott, K. (2015). Die sportliche Frau. Leistungsphysiologische Unterschiede zum Mann – Relevanz für die ärztliche Beratung. *Schweizer Zeitschrift für Gynäkologie*, 3(15), 6–10.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2012). Geschlechtsspezifische Formel für optimale Trainingsherzfrequenzen. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin*, 60(3), 102–105.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2010). *Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen*. Meyer & Meyer.
- Hottenrott, K., & Seidel, I. (Hrsg.). (2017). *Handbuch Trainingswissenschaft—Trainingslehre*. Hofmann.
- Howell, D. C. (2002). *Statistical methods for psychology* (5th ed). Duxbury/Thomson Learning.
- Hunt, B. E., Davy, K. P., Jones, P. P., DeSouza, C. A., Van Pelt, R. E., Tanaka, H., Seals, D. R., & (With the Technical Assistance of Cyndi Long and Mary Jo Reiling). (1998). Role of central circulatory factors in the fat-free mass-maximal aerobic capacity relation across age. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 275(4), H1178–H1182.  
<https://doi.org/10.1152/ajpheart.1998.275.4.H1178>
- Hunter, G. R., Newcomer, B. R., Weinsier, R. L., Karapondo, D. L., Larson-Meyer, D. E., Joanisse, D. R., & Bamman, M. M. (2002). Age is independently related to muscle metabolic capacity in premenopausal women. *Journal of Applied Physiology*, 93(1), 70–76.  
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01239.2001>

- Hunter, S. K. (2014). Sex differences in human fatigability: Mechanisms and insight to physiological responses. *Acta Physiologica*, 210(4), 768–789.  
<https://doi.org/10.1111/apha.12234>
- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., Rampinini, E., Mognoni, P., & Sassi, A. (2005). Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, 39(10), 747–751.  
<https://doi.org/10.1136/bjism.2004.017236>
- Jones, A. M., & Doust, J. H. (1998). The validity of the lactate minimum test for determination of the maximal lactate steady state. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(8), 1304–1313.  
<https://doi.org/10.1097/00005768-199808000-00020>
- Jones, Andrew M., & Carter, H. (2000). The Effect of Endurance Training on Parameters of Aerobic Fitness. *Sports Medicine*, 29(6), 373–386.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200029060-00001>
- Jones, Andrew M., Wilkerson, D. P., Burnley, M., & Koppo, K. (2003). Prior heavy exercise enhances performance during subsequent perimaximal exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(12), 2085–2092.  
<https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000099108.55944.C4>
- Jones, R. M., Cook, C. C., Kilduff, L. P., Milanović, Z., James, N., Sporiš, G., Fiorentini, B., Fiorentini, F., Turner, A., & Vučković, G. (2013). Relationship between Repeated Sprint Ability and Aerobic Capacity in Professional Soccer Players. *The Scientific World Journal*, 2013, 1–5.  
<https://doi.org/10.1155/2013/952350>
- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: The physiology of champions: Factors that make champions. *The Journal of Physiology*, 586(1), 35–44.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.143834>
- Juel, C. (2008). Regulation of pH in human skeletal muscle: Adaptations to physical activity. *Acta Physiologica (Oxford, England)*, 193(1), 17–24.  
<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2008.01840.x>
- Juel, C., Lundby, C., Sander, M., Calbet, J. A. L., & van Hall, G. (2003). Human skeletal muscle and erythrocyte proteins involved in acid-base homeostasis: Adaptations to chronic hypoxia. *The Journal of Physiology*, 548(2), 639–648.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2002.035899>
- Juel, Carsten, Klarskov, C., Nielsen, J. J., Krstrup, P., Mohr, M., & Bangsbo, J. (2004). Effect of high-intensity intermittent training on lactate and H<sup>+</sup> release from human skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 286(2), E245–E251.  
<https://doi.org/10.1152/ajpendo.00303.2003>
- Kappus, R. M., Ranadive, S. M., Yan, H., Lane-Cordova, A. D., Cook, M. D., Sun, P., Harvey, I. S., Wilund, K. R., Woods, J. A., & Fernhall, B. (2015). Sex differences in autonomic function following maximal exercise. *Biology of Sex Differences*, 6, 28.  
<https://doi.org/10.1186/s13293-015-0046-6>
- Karatzafieri, C., de Haan, A., van Mechelen, W., & Sargeant, A. J. (2001). Metabolism changes in single human fibres during brief maximal exercise. *Experimental Physiology*, 86(3), 411–415.  
<https://doi.org/10.1113/eph8602223>
- Katch, V., Weltman, A., Martin, R., & Gray, L. (1977). Optimal test characteristics for maximal anaerobic work on the bicycle ergometer. *Research Quarterly*, 48(2), 319–327.



- Kay, C., & Shepard, R. J. (1969). On muscle strength and the threshold of anaerobic work. *Int Z Angew Physiol*, 27, 311–328.
- Kayar, S. R., Lechner, A. J., & Banchemo, N. (1982). The distribution of diffusion distances in the gastrocnemius muscle of various mammals during maturation. *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology*, 394(2), 124–129.  
<https://doi.org/10.1007/BF00582913>
- Kenttä, G., & Hassmén, P. (1998). Overtraining and Recovery: A Conceptual Model. *Sports Medicine*, 26(1), 1–16.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-199826010-00001>
- Kindermann, W., Dickhuth, H.-H., Nieß, A., Röcker, K., & Urhausen, A. (2007). *Sportkardiologie: Körperliche Aktivität bei Herzerkrankungen*. Steinkopff Verlag Darmstadt.  
<http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=417435>
- Kindermann, W., & Scharhag, J. (2014). Die physiologische Herzhypertrophie (Sporthertrophie). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 2014(12), 327–332.  
<https://doi.org/10.5960/dzsm.2014.154>
- Klein, C., Cunningham, D. A., Paterson, D. H., & Taylor, A. W. (1988). Fatigue and recovery contractile properties of young and elderly men. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 57(6), 684–690.  
<https://doi.org/10.1007/BF01075989>
- Klinke, R., Pape, H.-C., Kurtz, A., Silbernagl, S., Baumann, R., Brenner, B., Gay, R., & Rothenburger, A. (Hrsg.). (2010). *Physiologie* (6., vollst. überarb. Aufl). Thieme.
- Klitgaard, H., Mannoni, M., Schiaffino, S., Ausoni, S., Gorza, L., Laurent-Winter, C., Schnohr, P., & Saltin, B. (1990). Function, morphology and protein expression of ageing skeletal muscle: A cross-sectional study of elderly men with different training backgrounds. *Acta Physiologica Scandinavica*, 140(1), 41–54.  
<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1990.tb08974.x>
- Korhonen, M. T., Suominen, H., & Mero, A. (2005). Age and Sex Differences in Blood Lactate Response to Sprint Running in Elite Master Athletes. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(6), 647–665.  
<https://doi.org/10.1139/h05-146>
- Krustrup, P., Mohr, M., Amstrup, T., Rysgaard, T., Johansen, J., Steensberg, A., Pedersen, P. K., & Bangsbo, J. (2003). The Yo-Yo Intermittent Recovery Test: Physiological Response, Reliability, and Validity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(4), 697–705.  
<https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000058441.94520.32>
- Laforest, S., St-Pierre, D. M., Cyr, J., & Gayton, D. (1990). Effects of age and regular exercise on muscle strength and endurance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 60(2), 104–111.  
<https://doi.org/10.1007/BF00846029>
- Laurent, C. M., Green, J. M., Bishop, P. A., Sjökvist, J., Schumacker, R. E., Richardson, M. T., & Curtner-Smith, M. (2010). Effect of gender on fatigue and recovery following maximal intensity repeated sprint performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 50(3), 243–253.
- Laurent, C. M., Vervaecke, L. S., Kutz, M. R., & Green, J. M. (2014). Sex-Specific Responses to Self-Paced, High-Intensity Interval Training With Variable Recovery Periods. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(4), 920–927.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182a1f574>

- Laursen, P. B., & Jenkins, D. G. (2002). The Scientific Basis for High-Intensity Interval Training: Optimising Training Programmes and Maximising Performance in Highly Trained Endurance Athletes. *Sports Medicine*, 32(1), 53–73.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200232010-00003>
- Lericollais, R., Gauthier, A., Bessot, N., & Davenne, D. (2011). Diurnal evolution of cycling biomechanical parameters during a 60-s Wingate test: Diurnal variation in cycling patterns. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6), e106–e114.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01172.x>
- Lexell, J. (1995). Human aging, muscle mass, and fiber type composition. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 50 Spec No, 11–16.  
[https://doi.org/10.1093/gerona/50a.special\\_issue.11](https://doi.org/10.1093/gerona/50a.special_issue.11)
- Lexell, J., & Downham, D. (1992). What is the effect of ageing on type 2 muscle fibres? *Journal of the Neurological Sciences*, 107(2), 250–251.  
[https://doi.org/10.1016/0022-510x\(92\)90297-x](https://doi.org/10.1016/0022-510x(92)90297-x)
- Leyk, D., Rütter, T., Wunderlich, M., Sievert, A., Eßfeld, D., Witzki, A., Erley, O., Küchmeister, G., Piekarski, C., & Löllgen, H. (2010). Physical Performance in Middle Age and Old Age. *Deutsches Arzteblatt Online*.  
<https://doi.org/10.3238/arztebl.2010.0809>
- Lievens, E., Klass, M., Bex, T., & Derave, W. (2020). Muscle fiber typology substantially influences time to recover from high-intensity exercise. *Journal of Applied Physiology*, 128(3), 648–659.  
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00636.2019>
- Loe, H., Rognmo, Ø., Saltin, B., & Wisløff, U. (2013). Aerobic Capacity Reference Data in 3816 Healthy Men and Women 20–90 Years. *PLoS ONE*, 8(5), e64319.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064319>
- Loellgen, Herbert, & Borg, Gunnar. (2004). Das Anstrengungsempfinden (RPE, Borg-Skala). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 55(11), 299–300.
- Lovell, D., Mason, D., Delphinus, E., Eagles, A., Shewring, S., & McLellan, C. (2011). Does Upper Body Strength and Power Influence Upper Body Wingate Performance in Men and Women? *International Journal of Sports Medicine*, 32(10), 771–775.  
<https://doi.org/10.1055/s-0031-1277206>
- Lupa, V. A., Podolin, D. A., Roth, D. A., & Mazzeo, R. S. (1994). Influence of aging and endurance training on lactate dehydrogenase in liver and skeletal muscle. *Mechanisms of Ageing and Development*, 75(3), 191–204.  
[https://doi.org/10.1016/0047-6374\(94\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0047-6374(94)90009-4)
- Macpherson, R. E. K., Hazell, T. J., Olver, T. D., Paterson, D. H., & Lemon, P. W. R. (2011). Run sprint interval training improves aerobic performance but not maximal cardiac output. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(1), 115–122.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181e5eacd>
- MacRae, H. S., Dennis, S. C., Bosch, A. N., & Noakes, T. D. (1992). Effects of training on lactate production and removal during progressive exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 72(5), 1649–1656.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1992.72.5.1649>
- Mahoney, D. J., & Tarnopolsky, M. A. (2005). Understanding skeletal muscle adaptation to exercise training in humans: Contributions from microarray studies. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 16(4), 859–873, vii.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmr.2005.08.018>

- Marcell, T. J., Hawkins, S. A., Tarpenning, K. M., Hyslop, D. M., & Wiswell, R. A. (2003). Longitudinal analysis of lactate threshold in male and female master athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(5), 810–817.  
<https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000065002.69572.6F>
- Marées, H. de, & Heck, H. (2006). *Sportphysiologie* (Korr. Nachdr. der 9., vollst. überarb. und erw. Aufl). Sportverl. Strauß.
- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 551–555.  
[https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2004\)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2004)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2)
- Matsuura, R., Ogata, H., Yunoki, T., Arimitsu, T., & Yano, T. (2006). Effect of blood lactate concentration and the level of oxygen uptake immediately before a cycling sprint on neuromuscular activation during repeated cycling sprints. *Journal of Physiological Anthropology*, 25(4), 267–273.  
<https://doi.org/10.2114/jpa2.25.267>
- Maud, P. J., & Shultz, B. B. (1989). Norms for the Wingate Anaerobic Test with Comparison to Another Similar Test. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 60(2), 144–151.  
<https://doi.org/10.1080/02701367.1989.10607429>
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015). *Exercise physiology: Nutrition, energy, and human performance* (Eighth edition). Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.
- McCormick, R., & Vasilaki, A. (2018). Age-related changes in skeletal muscle: Changes to life-style as a therapy. *Biogerontology*, 19(6), 519–536.  
<https://doi.org/10.1007/s10522-018-9775-3>
- McGawley, K., & Bishop, D. (2006). Reliability of a 5 x 6-s maximal cycling repeated-sprint test in trained female team-sport athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 98(4), 383–393.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-006-0284-8>
- McMillan, K., Helgerud, J., Macdonald, R., & Hoff, J. (2005). Physiological adaptations to soccer specific endurance training in professional youth soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 39(5), 273–277.  
<https://doi.org/10.1136/bjism.2004.012526>
- Meltzer, D. E. (1994). Age dependence of Olympic weightlifting ability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26(8), 1053–1067.
- Meßler, C. F., Holmberg, H.-C., & Sperlich, B. (2018). Multimodal Therapy Involving High-Intensity Interval Training Improves the Physical Fitness, Motor Skills, Social Behavior, and Quality of Life of Boys With ADHD: A Randomized Controlled Study. *Journal of Attention Disorders*, 22(8), 806–812.  
<https://doi.org/10.1177/1087054716636936>
- Messonnier, L., Freund, H., Denis, C., Féasson, L., & Lacour, J.-R. (2006). Effects of Training on Lactate Kinetics Parameters and their Influence on Short High-Intensity Exercise Performance. *International Journal of Sports Medicine*, 27(1), 60–66.  
<https://doi.org/10.1055/s-2005-837507>
- Metcalfe, R. S., Babraj, J. A., Fawkner, S. G., & Vollaard, N. B. J. (2012). Towards the minimal amount of exercise for improving metabolic health: Beneficial effects of reduced-exertion high-intensity interval training. *European Journal of Applied Physiology*, 112(7), 2767–2775.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-011-2254-z>

- Mier, C. M., Turner, M. J., Ehsani, A. A., & Spina, R. J. (1997). Cardiovascular adaptations to 10 days of cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, *83*(6), 1900–1906.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1997.83.6.1900>
- Milanović, Z., Sporiš, G., & Weston, M. (2015). Effectiveness of High-Intensity Interval Training (HIT) and Continuous Endurance Training for VO<sub>2</sub>max Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Trials. *Sports Medicine*, *45*(10), 1469–1481.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-015-0365-0>
- Morin, J.-B., Jeannin, T., Chevallier, B., & Belli, A. (2006). Spring-Mass Model Characteristics During Sprint Running: Correlation with Performance and Fatigue-Induced Changes. *International Journal of Sports Medicine*, *27*(2), 158–165.  
<https://doi.org/10.1055/s-2005-837569>
- Myers, J., Prakash, M., Froelicher, V., Do, D., Partington, S., & Atwood, J. E. (2002). Exercise capacity and mortality among men referred for exercise testing. *The New England Journal of Medicine*, *346*(11), 793–801.  
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa011858>
- Naughton, G., Carlson, J., & Fairweather, I. (1992). Determining the Variability of Performance on Wingate Anaerobic Tests in Children Aged 6-12 Years. *International Journal of Sports Medicine*, *13*(07), 512–517.  
<https://doi.org/10.1055/s-2007-1021308>
- Neumann, G., Hottenrott, L., & Hottenrott, K. (2019). Geschlechtsdimorphe Leistungsunterschiede im Seniorenalter in leichtathletischen Disziplinen. *Leistungssport*, *7*.
- Neumann, G., Pfützner, A., & Berbalk, A. (2013). *Optimiertes Ausdauertraining: Trainingsplanung, Leistungsaufbau, Ernährungstipps* (7. Aufl). Meyer & Meyer.
- Noakes, T. D., Myburgh, K. H., & Schall, R. (1990). Peak treadmill running velocity during the VO<sub>2</sub> max test predicts running performance. *Journal of Sports Sciences*, *8*(1), 35–45.  
<https://doi.org/10.1080/02640419008732129>
- Nummela, A., Alberts, M., Rijntjes, R., Luhtanen, P., & Rusko, H. (1996). Reliability and Validity of the Maximal Anaerobic Running Test. *International Journal of Sports Medicine*, *17*(S 2), S97–S102.  
<https://doi.org/10.1055/s-2007-972908>
- Nybo, L., Sundstrup, E., Jakobsen, M. D., Mohr, M., Hornstrup, T., Simonsen, L., Bülow, J., Randers, M. B., Nielsen, J. J., Aagaard, P., & Krstrup, P. (2010). High-intensity training versus traditional exercise interventions for promoting health. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *42*(10), 1951–1958.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d99203>
- Nygaard, E. (1981). Skeletal muscle fibre characteristics in young women. *Acta Physiologica Scandinavica*, *112*(3), 299–304.  
<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1981.tb06820.x>
- O'Brien, R. G., & Kaiser, M. K. (1985). MANOVA method for analyzing repeated measures designs: An extensive primer. *Psychological Bulletin*, *97*(2), 316–333.
- Ogawa, T., Spina, R. J., Martin, W. H., Kohrt, W. M., Schechtman, K. B., Holloszy, J. O., & Ehsani, A. A. (1992). Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise. *Circulation*, *86*(2), 494–503.  
<https://doi.org/10.1161/01.cir.86.2.494>

- Oosthuyse, T., & Bosch, A. N. (2010). The effect of the menstrual cycle on exercise metabolism: Implications for exercise performance in eumenorrhoeic women. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *40*(3), 207–227.  
<https://doi.org/10.2165/11317090-000000000-00000>
- Pate, R. R., & Branch, J. D. (1992). Training for endurance sport. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *24*(9 Suppl), S340-343.
- Patton, J., Murphy, M., & Frederick, F. (1985). Maximal Power Outputs During the Wingate Anaerobic Test. *International Journal of Sports Medicine*, *06*(02), 82–85.  
<https://doi.org/10.1055/s-2008-1025818>
- Perez-Gomez, J., Rodriguez, G. V., Ara, I., Olmedillas, H., Chavarren, J., González-Henriquez, J. J., Dorado, C., & Calbet, J. A. L. (2008). Role of muscle mass on sprint performance: Gender differences? *European Journal of Applied Physiology*, *102*(6), 685–694.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-007-0648-8>
- Perrey, S., Racinais, S., Saimouaa, K., & Girard, O. (2010). Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *European Journal of Applied Physiology*, *109*(6), 1027–1036.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-010-1445-3>
- Philp, A., Macdonald, A. L., Carter, H., Watt, P. W., & Pringle, J. S. (2008). Maximal lactate steady state as a training stimulus. *International Journal of Sports Medicine*, *29*(6), 475–479.  
<https://doi.org/10.1055/s-2007-965320>
- Pierpont, G. L., & Voth, E. J. (2004). Assessing autonomic function by analysis of heart rate recovery from exercise in healthy subjects. *The American Journal of Cardiology*, *94*(1), 64–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2004.03.032>
- Pilegaard, H., Saltin, B., & Neufer, P. D. (2003). Exercise induces transient transcriptional activation of the PGC-1 $\alpha$  gene in human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, *546*(Pt 3), 851–858.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2002.034850>
- Porter, M. M., Vandervoort, A. A., & Lexell, J. (1995). Aging of human muscle: Structure, function and adaptability. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *5*(3), 129–142.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1995.tb00026.x>
- Proctor, D. N., Beck, K. C., Shen, P. H., Eickhoff, T. J., Halliwill, J. R., & Joyner, M. J. (1998). Influence of age and gender on cardiac output-VO<sub>2</sub> relationships during submaximal cycle ergometry. *Journal of Applied Physiology*, *84*(2), 599–605.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1998.84.2.599>
- Prommer, N., & Schmidt, W. (2009). Hämoglobinmenge und Sport. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, *60*(9), 293–294.
- Racil, G. C., Coquart, J. B., Elmontassar, W., Haddad, M., Goebel, R., Chaouachi, A., Amri, M., & Chamari, K. (2016). Greater effects of high- compared with moderate-intensity interval training on cardiometabolic variables, blood leptin concentration and ratings of perceived exertion in obese adolescent females. *Biology of Sport*, *33*(2), 145–152.
- Raeder, C., Vuong, J.-L., & Ferrauti, A. (2020). Krafttraining. In Ferrauti, A. (Hrsg.). (2020). *Trainingswissenschaft für die Sportpraxis* (189 – 246). Springer: Berlin Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58227-5>

- Reindell, H., Musshoff, K., König, K., Gebhardt, W., Roskamm, H., & Keul, J. (2009). Volumen und Leistung des gesunden und kranken Herzens. *Acta Medica Scandinavica*, 181(S472), 88–112.  
<https://doi.org/10.1111/j.0954-6820.1967.tb12618.x>
- Reindell, H., & Roskamm, H. (1959). Ein Beitrag zu den physiologischen Grundlagen des Intervalltrainings unter besonderer Berücksichtigung des Kreislaufs. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin*, 7, 1–8.
- Robinson, M. M., Dasari, S., Konopka, A. R., Johnson, M. L., Manjunatha, S., Esponda, R. R., Carter, R. E., Lanza, I. R., & Nair, K. S. (2017). Enhanced Protein Translation Underlies Improved Metabolic and Physical Adaptations to Different Exercise Training Modes in Young and Old Humans. *Cell Metabolism*, 25(3), 581–592.  
<https://doi.org/10.1016/j.cmet.2017.02.009>
- Rønnestad, B. R., Hansen, J., Vegge, G., Tønnessen, E., & Slettaløkken, G. (2015). Short intervals induce superior training adaptations compared with long intervals in cyclists - An effort-matched approach: Short intervals vs long intervals. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25(2), 143–151.  
<https://doi.org/10.1111/sms.12165>
- Rønnestad, B. R., & Mujika, I. (2014). Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review: Strength training and endurance performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(4), 603–612.  
<https://doi.org/10.1111/sms.12104>
- Rozenek, R., Funato, K., Kubo, J., Hoshikawa, M., & Matsuo, A. (2007). Physiological Responses to Interval Training Sessions at Velocities Associated With Vo<sub>2</sub>max. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(1), 188.  
<https://doi.org/10.1519/R-19325.1>
- Ruby, B. C., Coggan, A. R., & Zderic, T. W. (2002). Gender differences in glucose kinetics and substrate oxidation during exercise near the lactate threshold. *Journal of Applied Physiology*, 92(3), 1125–1132.  
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00296.2001>
- Rudman, D., Feller, A. G., Nagraj, H. S., Gergans, G. A., Lalitha, P. Y., Goldberg, A. F., Schlenker, R. A., Cohn, L., Rudman, I. W., & Mattson, D. E. (1990). Effects of human growth hormone in men over 60 years old. *The New England Journal of Medicine*, 323(1), 1–6.  
<https://doi.org/10.1056/NEJM199007053230101>
- Sahlin, K. (1992). Metabolic factors in fatigue. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 13(2), 99–107.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-199213020-00005>
- Salkind, N. J., & Rasmussen, K. (Hrsg.). (2007). *Encyclopedia of measurement and statistics*. SAGE Publications.
- Saltin, B., & Astrand, P. O. (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology*, 23(3), 353–358.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1967.23.3.353>
- Saltin, B., & Gollnick, P. D. (1983). Skeletal muscle adaptability: Significance for metabolism and performance. In L. D. Peachey, R. H. Adrian, & S. R. Geiger (Hrsg.), *Handbook of Physiology. Section 10: Skeletal Muscle* (S. 555–631). American Physiological Society.
- Saltin, B., & Strange, S. (1992). Maximal oxygen uptake: „old“ and „new“ arguments for a cardiovascular limitation. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(1), 30–37.

- Sandoval, D. A., & Matt, K. S. (2002). Gender differences in the endocrine and metabolic responses to hypoxic exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 92(2), 504–512. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00526.2001>
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners: *Sports Medicine*, 34(7), 465–485. <https://doi.org/10.2165/00007256-200434070-00005>
- Scharhag, J., Löllgen, H., & Kindermann, W. (2013). Competitive Sports and the Heart. *Deutsches Aerzteblatt Online*. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2013.0014>
- Scheuer, J., & Tipton, C. M. (1977). Cardiovascular adaptations to physical training. *Annual Review of Physiology*, 39, 221–251. <https://doi.org/10.1146/annurev.ph.39.030177.001253>
- Schmidt, R. F., Lang, F., & Heckmann, M. (Hrsg.). (2017). *Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie: mit Online-Repetitorium* (Sonderausgabe der 31. Auflage). Springer.
- Schmidt, W. (1999). Die Bedeutung des Blutvolumens für den Ausdauersportler. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 50(11/12), 341–349.
- Schmitz, B., Niehues, H., Thorwesten, L., Klose, A., Krüger, M., & Brand, S.-M. (2020). Sex Differences in High-Intensity Interval Training—Are HIIT Protocols Interchangeable Between Females and Males? *Frontiers in Physiology*, 11, 38. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00038>
- Short, K. R., & Sedlock, D. A. (1997). Excess postexercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *Journal of Applied Physiology*, 83(1), 153–159. <https://doi.org/10.1152/jappl.1997.83.1.153>
- Silverman, H. G., & Mazzeo, R. S. (1996). Hormonal responses to maximal and submaximal exercise in trained and untrained men of various ages. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 51(1), B30-37. <https://doi.org/10.1093/gerona/51a.1.b30>
- Singh, T. P., Rhodes, J., & Gauvreau, K. (2008). Determinants of heart rate recovery following exercise in children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(4), 601–605. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181621ec4>
- Sinha-Hikim, I., Cornford, M., Gaytan, H., Lee, M. L., & Bhasin, S. (2006). Effects of testosterone supplementation on skeletal muscle fiber hypertrophy and satellite cells in community-dwelling older men. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 91(8), 3024–3033. <https://doi.org/10.1210/jc.2006-0357>
- Sipilä, S., & Suominen, H. (1991). Ultrasound imaging of the quadriceps muscle in elderly athletes and untrained men. *Muscle & Nerve*, 14(6), 527–533. <https://doi.org/10.1002/mus.880140607>
- Sipilä, S., Viitasalo, J., Era, P., & Suominen, H. (1991). Muscle strength in male athletes aged 70–81 years and a population sample. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 63(5), 399–403. <https://doi.org/10.1007/BF00364469>

- Slattery, K. M., Wallace, L. K., Murphy, A. J., & Coutts, A. J. (2006). Physiological determinants of three-kilometer running performance in experienced triathletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *20*(1), 47–52.  
<https://doi.org/10.1519/R-16724.1>
- Sperlich, B., Hoppe, M., & Haegele, M. (2013). Ausdauertraining – Dauermethode versus intensive Intervallmethode im Fußball. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, *2013*(01), 10–17.  
<https://doi.org/10.5960/dzsm.2012.052>
- Sperlich, Billy, De Marées, M., Koehler, K., Linville, J., Holmberg, H.-C., & Mester, J. (2011). Effects of 5 weeks of high-intensity interval training vs. Volume training in 14-year-old soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *25*(5), 1271–1278.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d67c38>
- Spina, R. J., Ogawa, T., Martin, W. H., Coggan, A. R., Holloszy, J. O., & Ehsani, A. A. (1992). Exercise training prevents decline in stroke volume during exercise in young healthy subjects. *Journal of Applied Physiology*, *72*(6), 2458–2462.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1992.72.6.2458>
- Stathokostas, L., Jacob-Johnson, S., Petrella, R. J., & Paterson, D. H. (2004). Longitudinal changes in aerobic power in older men and women. *Journal of Applied Physiology*, *97*(2), 781–789.  
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00447.2003>
- Stepito, N. K., Coffey, V. G., Carey, A. L., Ponnampalam, A. P., Canny, B. J., Powell, D., & Hawley, J. A. (2009). Global gene expression in skeletal muscle from well-trained strength and endurance athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *41*(3), 546–565.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818c6be9>
- Støren, Ø., Helgerud, J., Sæbø, M., Støa, E. M., Bratland-Sanda, S., Unhjem, R. J., Hoff, J., & Wang, E. (2017). The Effect of Age on the V̇O<sub>2</sub>max Response to High-Intensity Interval Training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *49*(1), 78–85.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001070>
- Sultana, F., Abbiss, C. R., Louis, J., Bernard, T., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2012). Age-related changes in cardio-respiratory responses and muscular performance following an Olympic triathlon in well-trained triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, *112*(4), 1549–1556.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-011-2115-9>
- Tanaka, H., Dinunno, F. A., Monahan, K. D., Clevenger, C. M., DeSouza, C. A., & Seals, D. R. (2000). Aging, habitual exercise, and dynamic arterial compliance. *Circulation*, *102*(11), 1270–1275.  
<https://doi.org/10.1161/01.cir.102.11.1270>
- Tanaka, H., Monahan, K. D., & Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, *37*(1), 153–156.  
[https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(00\)01054-8](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)01054-8)
- Tanaka, Hirofumi, & Seals, D. R. (2008). Endurance exercise performance in Masters athletes: Age-associated changes and underlying physiological mechanisms: Endurance performance and Masters athletes. *The Journal of Physiology*, *586*(1), 55–63.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.141879>
- Tarpenning, K. M., Hamilton-Wessler, M., Wiswell, R. A., & Hawkins, S. A. (2004). Endurance training delays age of decline in leg strength and muscle morphology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *36*(1), 74–78.  
<https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000106179.73735.A6>



- Theintz, G., Buchs, B., Rizzoli, R., Slosman, D., Clavien, H., Sizonenko, P. C., & Bonjour, J. P. (1992). Longitudinal monitoring of bone mass accumulation in healthy adolescents: Evidence for a marked reduction after 16 years of age at the levels of lumbar spine and femoral neck in female subjects. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, *75*(4), 1060–1065. <https://doi.org/10.1210/jcem.75.4.1400871>
- Thomas, J. R., Nelson, J. K., & Silverman, S. J. (2005). *Research methods in physical activity* (5th ed). Human Kinetics.
- Tjønnå, A. E., Lee, S. J., Rognmo, Ø., Stølen, T. O., Bye, A., Haram, P. M., Loennechen, J. P., Al-Share, Q. Y., Skogvoll, E., Slørdahl, S. A., Kemi, O. J., Najjar, S. M., & Wisløff, U. (2008). Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome: A pilot study. *Circulation*, *118*(4), 346–354. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.772822>
- Tokmakidis, S. P., Léger, L. A., & Piliandis, T. C. (1998). Failure to obtain a unique threshold on the blood lactate concentration curve during exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *77*(4), 333–342. <https://doi.org/10.1007/s004210050342>
- Tomasits, J., & Haber, P. (2016). *Leistungsphysiologie*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47260-6>
- Tomlin, D. L., & Wenger, H. A. (2001). The Relationship Between Aerobic Fitness and Recovery from High Intensity Intermittent Exercise: *Sports Medicine*, *31*(1), 1–11. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131010-00001>
- Tossavainen, M., Nummela, A., Paavolainen, L., Mero, A., & Rusko, H. (1996). Comparison of Two Maximal Anaerobic Cycling Tests. *International Journal of Sports Medicine*, *17*(S 2), S120–S124. <https://doi.org/10.1055/s-2007-972912>
- Trapp, E. G., Chisholm, D. J., & Boutcher, S. H. (2007). Metabolic response of trained and untrained women during high-intensity intermittent cycle exercise. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *293*(6), R2370–R2375. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00780.2006>
- Trappe, T. A., Carroll, C. C., Dickinson, J. M., LeMoine, J. K., Haus, J. M., Sullivan, B. E., Lee, J. D., Jemiolo, B., Weinheimer, E. M., & Hollon, C. J. (2011). Influence of acetaminophen and ibuprofen on skeletal muscle adaptations to resistance exercise in older adults. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *300*(3), R655–R662. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00611.2010>
- Trevizani, G. A., Benchimol-Barbosa, P. R., & Nadal, J. (2012). Effects of age and aerobic fitness on heart rate recovery in adult men. *Arquivos Brasileiros De Cardiologia*, *99*(3), 802–810. <https://doi.org/10.1590/s0066-782x2012005000069>
- Tschakert, G., & Hofmann, P. (2013). High-Intensity Intermittent Exercise: Methodological and Physiological Aspects. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *8*(6), 600–610. <https://doi.org/10.1123/ijsp.8.6.600>
- Vandewalle, H., Pérès, G., & Monod, H. (1987). Standard Anaerobic Exercise Tests: *Sports Medicine*, *4*(4), 268–289. <https://doi.org/10.2165/00007256-198704040-00004>

- Vincent, S., Zouhal, H., Moussa, E., Catheline, M., Bentue-Ferrer, D., Gratas-Delamarche, A., & Berthon, P. (2004). Plasma glucose, insulin and catecholamine responses to a Wingate test in physically active women and men. *European Journal of Applied Physiology*, *91*(1), 15–21. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0957-5>
- Wahl, P., Hägele, M., Zinner, C., Bloch, W., & Mester, J. (2010). High Intensity Training (HIT) für die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit von Normalpersonen und im Präventions- & Rehabilitationsbereich. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, *160*(23–24), 627–636. <https://doi.org/10.1007/s10354-010-0857-3>
- Watson, R. D. S., Hamilton, C. A., Jones, D. H., Reid, J. L., Stallard, T. J., & Littler, W. A. (1980). Sequential Changes in Plasma Noradrenaline during Bicycle Exercise. *Clinical Science*, *58*(1), 37–43. <https://doi.org/10.1042/cs0580037>
- Weber, C. L., & Schneider, D. A. (2000). Maximal accumulated oxygen deficit expressed relative to the active muscle mass for cycling in untrained male and female subjects. *European Journal of Applied Physiology*, *82*(4), 255–261. <https://doi.org/10.1007/s004210000214>
- Weber, Clare L., Chia, M., & Inbar, O. (2006). Gender Differences in Anaerobic Power of the Arms and Legs???A Scaling Issue: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *38*(1), 129–137. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000179902.31527.2c>
- Weineck, J. (2004). *Sportbiologie* (9. Aufl). Spitta-Verlag.
- Weltman, A., Seip, R. L., Snead, D., Weltman, J. Y., Haskvitz, E. M., Evans, W. S., Veldhuis, J. D., & Rogol, A. D. (1992). Exercise training at and above the lactate threshold in previously untrained women. *International Journal of Sports Medicine*, *13*(3), 257–263. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021263>
- Wenger, H. A., & Bell, G. J. (1986). The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *3*(5), 346–356. <https://doi.org/10.2165/00007256-198603050-00004>
- Weston, M., Taylor, K. L., Batterham, A. M., & Hopkins, W. G. (2014). Effects of Low-Volume High-Intensity Interval Training (HIT) on Fitness in Adults: A Meta-Analysis of Controlled and Non-Controlled Trials. *Sports Medicine*, *44*(7), 1005–1017. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0180-z>
- Weyand, P. G., Lee, C. S., Martinez-Ruiz, R., Bundle, M. W., Bellizzi, M. J., & Wright, S. (1999). High-speed running performance is largely unaffected by hypoxic reductions in aerobic power. *Journal of Applied Physiology*, *86*(6), 2059–2064. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.6.2059>
- WHO (2011). Haemoglobin concentrations for the diagnosis of anaemia and assessment of severity. Vitamin and Mineral Nutrition Information System. Geneva, World Health Organization, (WHO/NMH/NHD/MNM/11.1) <http://www.who.int/vmnis/indicators/haemoglobin.pdf>, (Zugriff am 10.03.2021)
- Wideman, L., Weltman, J. Y., Shah, N., Story, S., Veldhuis, J. D., & Weltman, A. (1999). Effects of gender on exercise-induced growth hormone release. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *87*(3), 1154–1162. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.3.1154>

- Wiswell, R. A., Jaque, S. V., Marcell, T. J., Hawkins, S. A., Tarpenning, K. M., Constantino, N., & Hyslop, D. M. (2000). Maximal aerobic power, lactate threshold, and running performance in master athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(6), 1165–1170. <https://doi.org/10.1097/00005768-200006000-00021>
- Wolf, A. (2010). Frau und Sport: Geschlechtsspezifische Unterschiede. *Gynäkologische Endokrinologie*, 8(4), 240–247. <https://doi.org/10.1007/s10304-010-0370-1>
- Wu, H., Kanatous, S. B., Thurmond, F. A., Gallardo, T., Isotani, E., Bassel-Duby, R., & Williams, R. S. (2002). Regulation of mitochondrial biogenesis in skeletal muscle by CaMK. *Science (New York, N. Y.)*, 296(5566), 349–352. <https://doi.org/10.1126/science.1071163>
- Wüst, R. C. I., Morse, C. I., De Haan, A., Jones, D. A., & Degens, H. (2008). Sex differences in contractile properties and fatigue resistance of human skeletal muscle: Sex differences in fatigue and contractile properties. *Experimental Physiology*, 93(7), 843–850. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2007.041764>
- Zupan, M. F., Arata, A. W., Dawson, L. H., Wile, A. L., Payn, T. L., & Hannon, M. E. (2009). Wingate Anaerobic Test peak power and anaerobic capacity classifications for men and women intercollegiate athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(9), 2598–2604. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b1b21b>

# Anhang

## Anhang A: Protokoll Eingangsdiagnostik

Name	Vorname	Geb.-Datum
------	---------	------------

Messdatum: \_\_\_\_\_

Raucher: Ja  Nein

Letzter Nikotinkonsum: \_\_\_\_\_

Medikamente: Ja  Nein

Wenn ja welche? \_\_\_\_\_

Berufliche Tätigkeit: \_\_\_\_\_

Sportliche Betätigung:

Stunden pro Woche: \_\_\_\_\_

Sportart(en):

---

---

**Allgemeine Anmerkungen:**

---

---

---

**Anthropometrie:**

Körpergröße (cm): \_\_\_\_\_ Taillenumfang: \_\_\_\_\_

Körpermasse (kg): \_\_\_\_\_

## EKG

auffällig  unauffällig

Anmerkungen:

---

---

## Hämodynamik

Manschettengröße: \_\_\_\_\_

1. Messung: \_\_\_\_\_:\_\_\_\_\_ 2. Messung: \_\_\_\_\_:\_\_\_\_\_ (3. Messung: \_\_\_\_\_:\_\_\_\_\_)

## Orthostasetest

Startzeit liegen: \_\_\_\_\_:\_\_\_\_\_ Startzeit stehen: \_\_\_\_\_:\_\_\_\_\_

## Handkrafttest

L1: \_\_\_\_\_ L2: \_\_\_\_\_ R1: \_\_\_\_\_ R2: \_\_\_\_\_

## Sprungkrafttest

Versuch 1: \_\_\_\_\_ Versuch 2: \_\_\_\_\_

## Anhang B: Protokoll VO<sub>2max</sub>-Test

<b>Name</b>	<b>Vorname</b>	<b>Geb.-Datum</b>
<b>Messdatum</b>	<b>Größe (m)</b>	<b>Gewicht (kg)</b>
<b>Maske</b>	<b>KF (%)</b>	<b>FFM (kg)</b>
<b>GU (kcal/d)</b>	<b>Visz.F.</b>	<b>H<sub>2</sub>O (%)</b>

**Sattelhöhe:** \_\_\_\_\_ **Lenkerhöhe:** \_\_\_\_\_ **Uhr:** \_\_\_\_\_

<b>Zeit</b>	<b>Leistung</b>	<b>HF</b>	<b>VO<sub>2</sub></b>	<b>RQ</b>	<b>Laktat</b>	<b>Glukose</b>
Ruhe	0					
	70					
	100					
	130					
	160					
	190					
	220					
	250					
	280					
	310					
	340					
	370					
	400					
	430					
	460					
E3	100					
Antritt1						
Antritt 2						

## Anhang C: Protokoll Wingate-Anaerobic-Test

<b>Name</b>	<b>Vorname</b>	<b>Geb.-Datum</b>
<b>Messdatum</b>	<b>Pausenzeit 1</b>	<b>Größe (m)</b>
<b>Gewicht (kg)</b>	<b>KF (%)</b>	<b>FFM (kg)</b>
<b>GU (kcal/d)</b>	<b>Visz.F.</b>	<b>H2O (%)</b>

**Uhr:**

**Maske:**

Zeit		Max. Leistung	Durch. Leistung	RPE	TQR	HF	VO2	RQ	Laktat	Glukose
	Ruhe									
	WT 1									
	Pause		100							
	WT2									
	Pause		100							
	WT 3									
	Pause		100							
	WT 4									
	E 3		100							
	E 6		100							
	E 9		100							
	E 12		100							
	E 15		100							

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit wahrheitsgemäß, dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig und nur mit den erlaubten Hilfen angefertigt habe, außer den im Schriftenverzeichnis angegebenen Hilfsmitteln keine weiteren Hilfsmittel benutzt und alle Stellen, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd entnommen sind, als solche kenntlich gemacht und einzeln nach ihrer Herkunft nachgewiesen habe, alle Stellen und Personen genannt habe, welche mich bei der Vorbereitung und Anfertigung der wissenschaftlichen Abschlussarbeit unterstützten, die eingereichte Dissertation noch keiner anderen Prüfungsbehörde in gleicher Form oder auszugsweise zur Prüfung vorgelegt habe und dass dieselbe noch nicht anderen Zwecken – auch nicht teilweise – gedient hat. Ich erkläre des Weiteren, dass ich in keiner Weise versucht habe, weder die Daten in der empirischen Erhebung noch die statistischen Analysen und die Ergebnisse zu beeinflussen oder zu verändern. Vorgenommene Modifizierungen der Rohdaten habe ich nachvollziehbar gekennzeichnet und begründet.

Halle (Saale), den 08.02.2022



---

(Vorname Name)