

Aus dem Veterinärwissenschaftlichen Department der Tierärztlichen
Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München

Arbeit angefertigt unter der Leitung von Prof. Dr. Ellen Kienzle

Angefertigt am LMU Biozentrum, Department Biologie II
(Prof. Dr. J. Matthias Starck)

Effekte langfristigen Ausdauertrainings auf den Energiestoffwechsel beim Haushund (Beagle)

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der tiermedizinischen Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

von Daniela Isabella Zollner

aus Regensburg

München 2012

Gedruckt mit der Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
Der Ludwig-Maximilians-Universität München

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Braun

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Kienzle

Korreferent/en: Univ.-Prof. Dr. Stangassinger

Tag der Promotion: 21. Juli 2012

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| INHALTSVERZEICHNIS | 1 |
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS..... | 7 |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 9 |
| TABELLENVERZEICHNIS | 13 |
| I. EINLEITUNG | 14 |
| II. LITERATURÜBERSICHT | 16 |
| 1. ENERGIESTOFFWECHSEL DER HUNDE IM SPEZIESVERGLEICH..... | 16 |
| 1.1. Grundlagen | 16 |
| 1.1.1. Ruhestoffwechsel | 17 |
| 1.1.2. Leistungsstoffwechsel | 17 |
| 1.1.3. Aerobe Kapazität (aerobic capacity)..... | 18 |
| 1.2. Messung des Energiebedarfs | 19 |
| 1.2.1. Indirekte Kalorimetrie (Respirometrie)..... | 19 |
| 1.2.2. Herzfrequenzmessungen | 20 |
| 1.2.3. Aktivitätsmessungen | 22 |
| 2. EFFEKTE VON AUSDAUERTRAINING | 22 |
| 2.1. Effekte des Trainings auf den Energiestoffwechsel..... | 23 |
| 2.2. Effekte des Trainings auf die Muskulatur | 24 |
| 2.3. Effekte des Trainings auf das kardiovaskuläre System..... | 25 |
| 2.3.1. Effekte des Trainings auf die Herzfrequenz..... | 25 |
| 2.3.2. Effekte des Trainings auf die Herzstruktur | 26 |
| 2.3.3. Effekte des Trainings auf die Herzleistung | 27 |
| 2.4. Effekte des Trainings auf die freie Aktivität..... | 27 |
| 3. REVERSIBILITÄT DER TRAININGSEFFEKTE..... | 28 |
| 3.1. Reversibilität der Veränderungen des Energiestoffwechsels..... | 28 |
| 3.2. Reversibilität der Veränderungen der Muskulatur | 29 |
| 3.3. Reversibilität der Veränderungen am Herzen | 29 |
| III. ARBEITSHYPOTHESEN..... | 31 |
| 1. KORRELATION ZWISCHEN HERZFREQUENZ UND SAUERSTOFFVERBRAUCH..... | 31 |
| 2. EFFEKTE LANGFRISTIGEN AUSDAUERTRAININGS | 31 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3. | REVERSIBILITÄT PHYSIOLOGISCHER TRAININGSANPASSUNGEN | 32 |
| IV. | MATERIAL UND METHODEN | 33 |
| 1. | TIERE | 33 |
| 1.1. | <i>Versuchstiere</i> | 33 |
| 1.2. | <i>Tierhaltung und -fütterung</i> | 33 |
| 2. | VERSUCHSAUFBAU..... | 34 |
| 3. | TRAININGSPLAN..... | 35 |
| 4. | LAUFBAND | 38 |
| 5. | WINDMASCHINE..... | 39 |
| 6. | DURCHGEFÜHRTE MESSUNGEN..... | 39 |
| 6.1. | <i>Herzfrequenzmessungen</i> | 40 |
| 6.1.1. | Verwendete Geräte..... | 40 |
| 6.1.2. | Durchführung der Herzfrequenzmessungen | 40 |
| 6.1.3. | Erhebung der Daten der Herzfrequenzmessungen..... | 40 |
| 6.2. | <i>Respirometrie</i> | 41 |
| 6.2.1. | Verwendete Geräte..... | 41 |
| 6.2.2. | Respirometriemaske | 42 |
| 6.2.3. | Durchführung der respirometrischen Messungen | 44 |
| 6.2.4. | Erhebung der Daten der respirometrischen Messungen..... | 45 |
| 6.3. | <i>Vermessung des Herzens mittels Echokardiographie</i> | 46 |
| 6.3.1. | Verwendete Geräte..... | 46 |
| 6.3.2. | Durchführung der Echokardiographie..... | 46 |
| 6.3.3. | Erhebung der Daten der Echokardiographie | 46 |
| 6.4. | <i>Elektrokardiographie</i> | 50 |
| 6.4.1. | Verwendete Geräte..... | 50 |
| 6.4.2. | Durchführung des Elektrokardiogramms..... | 50 |
| 6.4.3. | Erhebung der Daten des Elektrokardiogramms | 53 |
| 6.5. | <i>Muskeldickemessungen mittels Ultraschall</i> | 53 |
| 6.5.1. | Verwendete Geräte..... | 53 |
| 6.5.2. | Durchführung des Muskelultraschalls..... | 53 |
| 6.5.3. | Erhebung der Daten des Muskelultraschalls | 55 |
| 6.6. | <i>Temperaturmessungen</i> | 58 |
| 6.6.1. | Verwendete Geräte..... | 58 |
| 6.6.2. | Durchführung der Temperaturmessungen..... | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 6.6.3. Erhebung der Daten der Temperaturmessungen | 59 |
| 6.7. <i>Aktivitätsmessungen</i> | 59 |
| 6.7.1. Verwendete Geräte | 59 |
| 6.7.2. Durchführung der Aktivitätsmessungen | 60 |
| 6.7.3. Erhebung der Daten der Aktivitätsmessungen | 60 |
| 7. STATISTISCHE METHODEN | 60 |
| V. ERGEBNISSE | 62 |
| 1. HERZFREQUENZEN | 62 |
| 1.1. <i>Herzfrequenzen in Ruhe</i> | 62 |
| 1.2. <i>Herzfrequenzen unter Belastung</i> | 62 |
| 2. RESPIROMETRIE | 63 |
| 2.1. <i>Sauerstoffaufnahme</i> | 63 |
| 2.1.1. Sauerstoffaufnahme in Ruhe | 63 |
| 2.1.2. Sauerstoffaufnahme unter Belastung | 64 |
| 2.1.3. Stoffwechselquotient unter spezifischer Belastung | 65 |
| 2.2. <i>Korrelation von Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme</i> | 67 |
| 2.3. <i>Kohlendioxidabgabe</i> | 71 |
| 2.3.1. Kohlendioxidabgabe in Ruhe | 71 |
| 2.3.2. Kohlendioxidabgabe unter Belastung | 72 |
| 2.4. <i>Atemfrequenz</i> | 73 |
| 2.4.1. Atemfrequenz in Ruhe | 73 |
| 2.4.2. Atemfrequenz unter Belastung | 74 |
| 2.5. <i>Expirationsvolumen</i> | 75 |
| 2.5.1. Expirationsvolumen in Ruhe | 75 |
| 2.5.2. Expirationsvolumen unter Belastung | 76 |
| 2.6. <i>Atemminutenvolumen</i> | 77 |
| 2.6.1. Atemminutenvolumen in Ruhe | 77 |
| 2.6.2. Atemminutenvolumen unter Belastung | 78 |
| 3. ECHOKARDIOGRAPHIE | 79 |
| 3.1. <i>Herzstruktur</i> | 79 |
| 3.1.1. Wanddicken des linken Ventrikels und des Septums | 79 |
| 3.1.2. Durchmesser des linken Ventrikels | 80 |
| 3.1.3. Aortendurchmesser | 80 |
| 3.2. <i>Herzfunktionsparameter</i> | 81 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.1. Verkürzungsfraction | 81 |
| 3.2.2. Schlagvolumen | 81 |
| 3.2.3. Maximale Auswurfgeschwindigkeit | 81 |
| 3.2.4. Geschwindigkeits-Zeit-Integral | 82 |
| 4. ELEKTROKARDIOGRAMM | 82 |
| 4.1. <i>Ruhe-EKG</i> | 82 |
| 4.1.1. Mittlere Herzfrequenz | 82 |
| 4.1.2. Maximale Herzfrequenz | 83 |
| 4.1.3. Minimale Herzfrequenz | 84 |
| 4.2. <i>Belastungs-EKG</i> | 85 |
| 4.2.1. Mittlere Herzfrequenz | 85 |
| 4.2.2. Maximale Herzfrequenz | 86 |
| 4.2.3. Minimale Herzfrequenz | 86 |
| 5. MUSKELDICKEN | 87 |
| 5.1. <i>M. supraspinatus und M. trapezius</i> | 87 |
| 5.2. <i>M. infraspinatus und M. deltoideus</i> | 87 |
| 5.3. <i>M. biceps femoris und M. vastus lateralis</i> | 87 |
| 5.4. <i>M. longissimus dorsi</i> | 88 |
| 6. TEMPERATURMESSUNGEN | 89 |
| 6.1. <i>Innentemperaturen</i> | 89 |
| 6.2. <i>Außentemperaturen</i> | 91 |
| 7. AKTIVITÄTSMESSUNGEN | 92 |
| 7.1. <i>Aktivitäten an den unterschiedlichen Wochentagen</i> | 92 |
| 7.2. <i>Aktivitäten in den unterschiedlichen Versuchsphasen</i> | 94 |
| 7.3. <i>Aktivität und Außentemperatur</i> | 95 |
| 8. KÖRPERGEWICHTE | 96 |
| 8.1. <i>BCS</i> | 96 |
| 8.2. <i>Körpergewicht</i> | 97 |
| VI. DISKUSSION | 99 |
| 1. KRITIK DER METHODIK | 99 |
| 1.1. <i>Herzfrequenzmessung</i> | 99 |
| 1.2. <i>Respirometrie</i> | 100 |
| 1.3. <i>Echokardiographie</i> | 101 |
| 1.4. <i>Muskelultraschall</i> | 102 |

| | |
|---|------------|
| 1.5. <i>Aktivitätsmessungen</i> | 102 |
| 2. KORRELATION VON HERZFREQUENZ UND SAUERSTOFFVERBRAUCH | 103 |
| 3. EFFEKTE VON AUSDAUERTRAINING | 107 |
| 3.1. <i>Effekte des Trainings auf den Energiestoffwechsel</i> | 107 |
| 3.1.1. Effekte des Trainings auf die Sauerstoffaufnahme und die Kohlendioxidabgabe | 108 |
| 3.1.2. Stoffwechselquotient unter spezifischer Belastung | 111 |
| 3.1.3. Effekte des Trainings auf die Atemfrequenz, das Expirationsvolumen und das Atemminutenvolumen | 112 |
| 3.2. <i>Effekte des Trainings auf die Muskulatur</i> | 115 |
| 3.3. <i>Effekte des Trainings auf das kardiovaskuläre System</i> | 116 |
| 3.3.1. Effekte des Trainings auf die Herzfrequenz..... | 116 |
| 3.3.2. Effekte des Trainings auf die Herzstruktur | 118 |
| 3.3.3. Effekte des Trainings auf die Herzfunktion | 120 |
| 3.4. <i>Effekte auf die freie Aktivität</i> | 122 |
| 3.4.1. Effekte der Wochentage | 122 |
| 3.4.2. Effekte der unterschiedlichen Versuchsphasen..... | 123 |
| 4. REVERSIBILITÄT DER TRAININGSEFFEKTE..... | 124 |
| 4.1. <i>Reversibilität der Veränderungen des Energiestoffwechsels</i> | 124 |
| 4.2. <i>Reversibilität der Veränderungen der Muskulatur</i> | 125 |
| 4.3. <i>Reversibilität der Veränderungen am Herzen</i> | 126 |
| VII. ZUSAMMENFASSUNG..... | 128 |
| VIII. SUMMARY | 131 |
| IX. LITERATURÜBERSICHT | 134 |
| X. ANHANG | 144 |
| 1. TECHNISCHE DATEN | 144 |
| 1.1. <i>Windmaschine</i> | 144 |
| 1.2. <i>Meta-Max-Gerät</i> | 144 |
| 1.3. <i>Televet100</i> | 144 |
| 1.4. <i>Actical</i> | 145 |
| 2. FORMELN | 145 |
| 2.1. <i>Energiestoffwechsel</i> | 145 |
| 2.2. <i>Herzfrequenzmessungen</i> | 145 |

| | |
|---|------------|
| 2.3. <i>Echokardiographie</i> | 146 |
| 2.4. <i>Respirometrie</i> | 146 |
| XI. EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG | 147 |
| XII. DANKSAGUNG | 148 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------------------|--|
| ANOVA | analysis of variance |
| BCS | Body condition score |
| BMR | basal metabolic rate, Basalstoffwechsel |
| C _a O ₂ | Sauerstoffgehalt von arteriellem Blut |
| cm | Zentimeter |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| C _v O ₂ | Sauerstoffgehalt von venösem Mischblut |
| d | Ventrikeldurchmesser in Systole bzw. Diastole [cm] |
| DEE | daily energy expenditure |
| EDD | enddiastolischer Durchmesser des linken Ventrikels |
| EDV | enddiastolisches Volumen des linken Ventrikels |
| ee | energy expenditure |
| EF | Ejektionsfraktion |
| EPOC | excess post-exercise O ₂ -consumption |
| ESD | endsystolischer Durchmesser des linken Ventrikels |
| ESV | endsystolisches Volumen des linken Ventrikels |
| f _A | Atemfrequenz |
| f _H | Herzfrequenz |
| FS | shortening fraction, Verkürzungsfraktion |
| g | Gramm |
| H ₂ O | Wasser |
| HF | Herzfrequenz |
| k | Wirkungsgrad |
| kcal | Kilokalorien |
| kg | Kilogramm |
| km/h | Kilometer pro Stunde |
| l | Liter |
| M. | musculus |
| ME | metabolizable energy, umsetzbare Energie |
| MER | maintenance energy requirement |
| min | Minute |
| ml | Milliliter |
| mm | Millimeter |

| | |
|-----------------------------|--|
| MR | metabolic rate, Leistungsstoffwechsel |
| MW | Mittelwert |
| N _{ur} | über den Urin ausgeschiedener Stickstoff |
| O ₂ | Sauerstoff |
| ODBA | overall dynamic body acceleration |
| p | Signifikanzniveau |
| Q _{CO₂} | Menge des produzierten Kohlenstoffdioxids |
| Q _{O₂} | Menge des verbrauchten Sauerstoffs |
| R ² | Bestimmtheitsmaß |
| RMR | resting metabolic rate, Ruhestoffwechsel |
| RQ | respiratorischer Quotient (V_{CO_2}/V_{O_2}) |
| s | Sekunde |
| s | Standardabweichung |
| SDA | specific dynamic action, spezifisch-dynamische Wirkung |
| SusMR | sustained metabolic rate |
| SusMS | sustained metabolic scope |
| SV | Schlagvolumen des Herzens |
| TEE | total energy expenditure |
| V | Ventrikelvolumen in Systole bzw. Diastole [ml] |
| V _{CO₂} | Kohlenstoffdioxidproduktion |
| V _E | Atemminutenvolumen |
| V _e | Atemzugvolumen |
| V _{O₂} | Sauerstoffverbrauch |
| vol% | Volumenprozent |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: zeitlicher Ablauf des Versuches: Gewöhnungsphase, Messphase untrainiert I (MPh), Training, Messphase trainiert (MPh), trainingsfreie Zeit (trfr. Zeit), Messphase untrainiert II (MPh). | 35 |
| Abbildung 2: Aufbau des extensiven Intervalltrainings mit langsamen Intervallen (blaue Balken) und schnellen Intervallen (rote Balken). | 37 |
| Abbildung 3: Aufbau des Pyramidentrainings mit langsamen (blaue Balken) und schnellen (rote Balken) Intervallen. | 37 |
| Abbildung 4: speziell angefertigte Respirometriemaske in seitlicher Ansicht. | 43 |
| Abbildung 5: speziell angefertigte Respirometriemaske mit Volumensensor und Sensor-Schutz am Hund. | 43 |
| Abbildung 6: Vermessung der Myokarddicken: Septum während Diastole (sd), Septum während Systole (ss), Wand des linken Ventrikels während Diastole (vd) und Wand des linken Ventrikels während Systole (vs). | 47 |
| Abbildung 7: Vermessung der Ventrikeldurchmesser: endsystolischer Durchmesser (ESD) und enddiastolischer Durchmesser (EDD). | 48 |
| Abbildung 8: Vermessung des Aortendurchmessers (ad) während der Systole. | 49 |
| Abbildung 9: Ermittlung des Schlagvolumens durch Konturmarkierung mit Hilfe des Trackballs. | 50 |
| Abbildung 10: Positionierung der EKG-Elektroden am Tier (Ansicht von links). | 51 |
| Abbildung 11: Positionierung der EKG-Elektroden am Tier (Ansicht von rechts). | 51 |
| Abbildung 12: Befestigung der EKG-Elektroden für das Belastungs-EKG. | 52 |
| Abbildung 13: Befestigung des transportablen Televet100 für das Belastungs-EKG. | 52 |
| Abbildung 14: Vermessung des M. supraspinatus und des flach aufliegenden M. trapezius: spina scapulae (ss), fascia profunda (fp) und fossa supraspinata (fs). | 55 |
| Abbildung 15: Vermessung des M. infraspinatus und des M. deltoideus: spina scapulae (ss), fascia profunda (fp) und fossa infraspinata (fi). | 56 |
| Abbildung 16: Vermessung des M. biceps femoris und des M. vastus lateralis: Femur (fe), M. biceps femoris (Mbf), M. vastus lateralis (Mvl) und fascia lata (fl). | 57 |
| Abbildung 17: Vermessung des M. longissimus dorsi: processus spinosus (ps) und arcus vertebrae (av). | 58 |
| Abbildung 18: Fünf-Minuten-Minima der Ruheherzfrequenzen von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 62 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 19: Drei-Minuten-Mittelwerte der Herzfrequenzen unter Belastung von acht Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 63 |
| Abbildung 20: Drei-Minuten-Mittelwerte des absoluten (A) und des relativen (B) Sauerstoffverbrauchs in Ruhe von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 64 |
| Abbildung 21: Drei-Minuten-Mittelwerte des absoluten Sauerstoffverbrauchs unter Belastung von acht Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 64 |
| Abbildung 22: Drei-Minuten-Mittelwerte des relativen Sauerstoffverbrauchs unter Belastung von acht Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 65 |
| Abbildung 23: Stoffwechselquotient unter spezifischer Belastung (MR/RMR) von acht Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 67 |
| Abbildung 24: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme im Zustand „untrainiert I“ mit Regressionsgerade (- - - -) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen). | 68 |
| Abbildung 25: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme im trainierten Zustand mit Regressionsgerade (- - - -) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen). | 69 |
| Abbildung 26: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme im Zustand „untrainiert II“ mit Regressionsgerade (- - - -) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen). | 70 |
| Abbildung 27: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme mit Datenpaaren aller drei Messphasen mit Regressionsgerade (- - - -) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen)..... | 71 |
| Abbildung 28: Drei-Minuten-Mittelwerte der absoluten (A) und der relativen (B) Kohlendioxidabgabe in Ruhe von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 72 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 29: Drei-Minuten-Mittelwerte der absoluten Kohlendioxidabgabe unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 72 |
| Abbildung 30: Drei-Minuten-Mittelwerte der relativen Kohlendioxidabgabe unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 73 |
| Abbildung 31: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemfrequenzen in Ruhe von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 74 |
| Abbildung 32: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemfrequenzen unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 75 |
| Abbildung 33: Drei-Minuten-Mittelwerte der Expirationsvolumina in Ruhe von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 76 |
| Abbildung 34: Drei-Minuten-Mittelwerte der Expirationsvolumina unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C). | 77 |
| Abbildung 35: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemminutenvolumina in Ruhe von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 78 |
| Abbildung 36: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemminutenvolumina unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 79 |
| Abbildung 37: Verkürzungsfraktion (FS) von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•)..... | 81 |
| Abbildung 38: Mittlere Ruhe-Herzfrequenz von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•)..... | 83 |
| Abbildung 39: maximale Ruhe-Herzfrequenz von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•)..... | 84 |
| Abbildung 40: minimale Ruhe-Herzfrequenz von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•)..... | 85 |
| Abbildung 41: Maximale Herzfrequenzen unter Belastung von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 86 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 42: Minimale Herzfrequenzen unter Belastung von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C)..... | 87 |
| Abbildung 43: Dicke des M. biceps femoris bzw. M. vastus lateralis von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•)..... | 88 |
| Abbildung 44: Dicke des M. longissimus dorsi von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•)..... | 89 |
| Abbildung 45: Temperaturkurve (Innentemperatur) über den gesamten Versuchszeitraum..... | 90 |
| Abbildung 46: Temperaturkurve (Außentemperatur) über den gesamten Versuchszeitraum; Die senkrechten Linien kennzeichnen die verschiedenen Versuchsphasen (UTI: Messphase untrainiert I, T: Messphase trainiert, trfr. Zeit: trainingsfreie Zeit, UTII: Messphase untrainiert II)..... | 91 |
| Abbildung 47: Durchschnittstemperaturen (Außentemperaturen) [MW \pm s] während den einzelnen Messphasen; untrainiert I (•), trainiert (•) und untrainiert II (•)..... | 92 |
| Abbildung 48: Aktivität der Hunde an den jeweiligen Wochentagen (Tagesmittelwert über den gesamten Versuchszeitraum) mit Standardabweichungen..... | 93 |
| Abbildung 49: Mittelwerte der Aktivitäten der Hunde in den jeweiligen Versuchsphasen (Messphase „untrainiert I“: UTI; Messphase „trainiert“: T; trainingsfreie Zeit: trfr. Zeit) mit Standardabweichungen. | 94 |
| Abbildung 50: Mittelwerte der Wochenendaktivitäten der Hunde in den jeweiligen Versuchsphasen (Messphase „untrainiert I“: UTI; Messphase „trainiert“: T; trainingsfreie Zeit: trfr. Zeit) mit Standardabweichungen. | 95 |
| Abbildung 51: Freien Aktivität der Hunde [MW \pm s] in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. | 96 |
| Abbildung 52: Body condition score (BCS) von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•)..... | 97 |
| Abbildung 53: durchschnittliches Gewicht der Hunde im Versuchsverlauf..... | 97 |
| Abbildung 54: Körpergewicht von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•). | 98 |
| Abbildung 55: Regressionsgeraden der Korrelation von Herzfrequenz (HF) und relativen Sauerstoffverbrauch bei Beagle und FBI-Hunden. | 105 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: gelaufene Geschwindigkeiten im Grundlagentraining..... | 36 |
| Tabelle 2: Verteilung der verschiedenen Trainingsarten über den gesamten Trainingszeitraum. Grundlagentraining (GLT), Extensives Intervalltraining (EIT) Pyramidentraining (PT) und Schwellentests (ST). | 38 |
| Tabelle 3: Sensortypen des MetaMax-Gerätes | 41 |
| Tabelle 4: geschaltete Lokomotionsmuskulatur. | 54 |
| Tabelle 5: Sauerstoffverbrauch [l/min] während Ruhemessung (RMR) bzw. Schwellentest (MR, 12km/h) und der Stoffwechselquotient (Verhältnis Ruhe-/Leistungsstoffwechsel); Werte jeweils über alle drei Messphasen gemittelt; MW: Mittelwert, s: Standardabweichung..... | 66 |
| Tabelle 6: Gleichungen der Regressionsgeraden jeweils im Zustand „untrainiert I“, „trainiert“, „untrainiert II“ und Gesamtgleichung über alle drei Messphasen. Mit Bestimmtheitsmaß (R^2) und Korrelationskoeffizient (R). | 68 |
| Tabelle 7: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) der echokardiographischen Parameter: Dicken des linken Ventrikels (LV) in Diastole und Systole, Dicken des Septums in Diastole und Systole, Durchmesser des linken Ventrikels in Diastole und Systole und Aortendurchmesser jeweils im Zustand „untrainiert I“, „trainiert“ und „untrainiert II“ | 80 |
| Tabelle 8: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) der Herzfunktionsparameter..... | 82 |
| Tabelle 9: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) der mittleren Herzfrequenz in den jeweiligen Geschwindigkeiten und Messphasen;..... | 85 |
| Tabelle 10: mittlere Muskeldicken von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“, „trainiert“ und „untrainiert II“ | 89 |
| Tabelle 11: Temperaturmaxima, -minima und –durchschnitte [MW \pm s] während den drei Messphasen. | 90 |
| Tabelle 12: Mittelwerte und Signifikanzniveau aus dem Vergleich der einzelnen Wochentage..... | 93 |
| Tabelle 13: technische Daten der Windmaschine. | 144 |
| Tabelle 14: technische Daten des MetaMax-Gerätes..... | 144 |
| Tabelle 15: technische Daten des Televet 100 | 144 |
| Tabelle 16: technische Daten des Acticals..... | 145 |

I. Einleitung

Der Stellenwert des Hundes ist besonders in unserer Kultur in den letzten Jahren enorm gestiegen. Da wundert es nicht, dass sich die ungesunde und zu reichhaltige Ernährung unserer Gesellschaft nicht selten auch in fettleibigen Hunden widerspiegelt. Das, aber auch der vermehrte Einsatz von Hunden im Hundesportbereich oder als Arbeitstiere (Polizei- oder Zollhunde, Behindertenbegleithunde etc.) macht insbesondere die Ernährungsberatung in der tierärztlichen Praxis zu einem wichtigen Teil der täglichen Arbeit. Um die Ernährung individuell an die Bedürfnisse des einzelnen Hundes anpassen zu können, ist vor allem die Kenntnis des genauen Energiebedarfs essentiell. Dieser Energiebedarf ist neben anderen Faktoren wie Umgebungstemperatur, Reproduktionsstatus, Rasse, Gesundheitsstatus und individueller Fitness etc, auch maßgeblich von der Körpergröße bzw. dem Körpergewicht abhängig. Das Erscheinungsbild ist aber beim Haushund so variabel wie bei sonst kaum einem Säugetier. Die Spannweite der physiologischen Körpergewichte innerhalb einer Spezies ist beim Hund einzigartig, ähnliche Varianzen sind nur beim Pferd zu finden (Finke, 1991). Die Züchtung zunehmend spezialisierter Rassen hat außerdem dazu geführt, dass Hunde trotz ähnlicher Körpergröße und –masse teilweise erhebliche Unterschiede (beispielsweise bedingt durch Varianzen ihrer Thermoneutralzonen, des Temperaments, der Haltungsformen, des Körperbaus etc.) in ihrem Energiebedarf zeigen (Kienzle and Rainbird, 1991). Diese Tatsache macht deutlich, dass eine Ernährungsberatung basierend auf anhand des Körpergewichtes grob geschätzter Energiebedarfswerten (Voraussetzung hierfür ist nicht nur eine Körpermassekonstanz, sondern auch eine gleichbleibende Körpermassezusammensetzung!) den heutigen Ansprüchen der Hundehaltung nicht mehr gerecht wird. Da zwischen der Herzfrequenz und dem Sauerstoffverbrauch – und damit dem Energieverbrauch – eines ausgewachsenen Tieres eine lineare Beziehung besteht, wäre eine mögliche Lösung für dieses Problem die Heranziehung der Herzfrequenzmessung als Methode zur Abschätzung des individuellen Energieverbrauchs. Da aber rasse- bzw. größenabhängige Differenzen zwischen den Herzfrequenzen und Energiestoffwechsel (Kleiber, 1947; Mai, 2006; Schmidt-Nielsen, 1984) bestehen, ist eine Untersuchung auf mögliche rassespezifische Unterschiede des Zusammenhangs von Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch und die Erstellung möglichst vieler exakter Regressionsgleichungen für unterschiedliche Rassen und Typen notwendig.

Ein weiteres immer wichtiger werdendes Feld der modernen Tiermedizin ist die Rehabilitation und Krankheitsprophylaxe bei Arbeitshunden oder im Bereich des Hundesports. Um für diese beiden Tätigkeitsbereiche ideale, auf das jeweilige Ziel abgestimmte, Trainingsprogramme entwerfen zu können, ist eine genaue Kenntnis der physiologischen Anpassungsvorgänge des Körpers auf den Trainingsstimulus unbedingt notwendig. Über die Auswirkungen von Training auf den Organismus des Hundes wurden zwar bereits mehrere Arbeiten angefertigt (Bove et al., 1979; Musch et al., 1985; Stepien et al., 1998; Wyatt and Mitchell, 1974), doch widersprechen sich die Ergebnisse vor allem bezüglich der Veränderungen der Herzmorphologie und der Herzfunktion, aber auch bezüglich des Energiestoffwechsels zum Teil erheblich. Deshalb wurden in dieser Studie die Schwerpunkte teilweise anders gesetzt. Insbesondere wurde auf standardisierte Trainings- und Messbedingungen geachtet, was beispielsweise bei der Untersuchung des Energiestoffwechsels von unter Feldbedingungen arbeitenden Schlittenhunden von Gerth et al. (2010) nicht möglich war. Außerdem wurden die Hunde in der vorliegenden Studie über einen Zeitraum von vier Monaten trainiert, was deutlich länger ist als in den meisten anderen Forschungsarbeiten zu diesem Thema (Beyreuther, 2007; Musch et al., 1985; Ruoss, 2011), in denen die Trainingsdauer meist sechs bis zwölf Wochen betrug. Eine große Rolle spielt außerdem die Gewöhnung der Hunde an Laufband und Messgeräte. In unserer Studie wurden die Tiere über einen Zeitraum von 15 Wochen an das Prozedere herangeführt. Zum Vergleich: Bove et al. (1979) verwendeten drei Tage für die Gewöhnung.

Um Ergebnisse einiger bereits durchgeführten Studien (Sneddon et al., 1989; Tipton et al., 1974) zu überprüfen wurde auch die Reversibilität der trainingsbedingten Anpassungsvorgänge des Organismus untersucht.

Die Ziele dieser Arbeit waren also:

- Die Etablierung einer Regressionsgleichung für Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch für Hunde kleiner bis mittelgroßer Rassen unter standardisierten Bedingungen
- Untersuchung der Effekte von Langzeittraining auf Energiestoffwechsel, Muskeldicke, Herzmorphologie und –funktion und freie Aktivität
- Untersuchung der Reversibilität möglicher trainingsbedingter Anpassungsvorgänge

II. Literaturübersicht

1. Energiestoffwechsel der Hunde im Speziesvergleich

1.1. Grundlagen

Der Körper benötigt für sämtliche Aktivitäten und Stoffwechselfvorgänge Energie. Die Bereitstellung dieser Energie (vor allem in Form von ATP - Adenosintriphosphat) ist lebensnotwendig und hat für einen Organismus oberste Priorität. Ein Großteil davon wird durch oxidativen Abbau von Nährstoffen, die mit der Nahrung aufgenommen werden, gewonnen. Eine Vielzahl der heute verwendeten Methoden für die Messung des Energiebedarfs beruht darauf und verwendet Sauerstoff als zentrales Element für die Berechnungen. Folgende Formel für den Menschen nach Schoeller und Webb (1984) verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen Sauerstoffverbrauch, Kohlendioxidproduktion und dem Energieumsatz (metabolic rate):

$$MR = 3,941 \times Q_{O_2} + 1,106 \times Q_{CO_2} - 2,17 \times N_{Ur}$$

MR: Metabolic rate [kcal/Tag]

Q_{O_2} : Menge des verbrauchten Sauerstoffs [l/Tag]

Q_{CO_2} : Menge des produzierten Kohlenstoffdioxids [l/Tag]

N_{Ur} : über den Urin ausgeschiedener Stickstoff [g/Tag]

Sind die Stickstoffverluste über den Urin nicht bekannt, kann auch folgende Formel nach Weir (1949) verwendet werden (die Formel berücksichtigt zwar die unvollständige Proteinoxidation nicht, diese macht aber nur ca. 2,5% aus und ist daher für näherungsweise Angaben zu vernachlässigen):

$$MR = (3,9 \times Q_{O_2} + 1,1 \times Q_{CO_2}) \times 1,44$$

Der Tagesenergieverbrauch eines Individuums (daily energy expenditure, DEE) setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen: Grundstoffwechsel (basal metabolic rate, BMR), Energieverbrauch für Bewegung (activity energy expenditure, AEE), temperaturabhängiger Energieverbrauch und Energie für Verdauung und dadurch erlittene Energieverluste in Form von Wärme, die so genannte spezifische dynamische Action, SDA (Wilson et al., 2006).

1.1.1. Ruhestoffwechsel

Zwischen Ruhestoffwechsel (resting metabolic rate, RMR) und Grundstoffwechsel muss unterschieden werden. Die BMR beschreibt die niedrigste Stoffwechselrate von ausgewachsenen, postabsorptiven und nicht reproduzierenden Tieren in ihrer Thermoneutralzone im Schlaf, wohingegen die RMR die niedrigste Stoffwechselrate in Ruhe, aber im wachen Zustand darstellt. Gerade bei Tieren ist die Messung der BMR oftmals schwierig durchzuführen, deshalb wird vor allem die RMR verwendet.

Der Ruhestoffwechsel macht ca. 60-80% der DEE aus (Poehlman and Danforth, 1991), kann aber zwischen Individuen stark variieren. 50-70% dieser Unterschiede haben ihren Ursprung in Variationen der fettfreien (und damit metabolisch aktiven) Körpermasse (fat free mass, FFM). Weitere individuelle Einflussfaktoren sind: Genetik, Schilddrüsenfunktion, Proteinstoffwechsel, sympathisches Nervensystem etc. (Schulz and Schoeller, 1994; Speakman and Selman, 2003). Trotz dieser vielfältigen Einflussfaktoren weisen die RMR und das Körpergewicht eine so enge Beziehung auf, dass allein vom Körpergewicht (zumindest näherungsweise) auf die RMR geschlossen werden kann (Weibel et al., 2004). Dieser enge Zusammenhang hat gerade bei der Spezies Hund große Bedeutung, da hinsichtlich des Körpergewichtes zwischen den einzelnen Rassen enorme Unterschiede bestehen können. Erwachsene normalgewichtige Hunde einer Rasse können Körpergewichte aufweisen, die das 100fache eines Vertreters sehr kleiner Rassen ausmachen (Burger and Johnson, 1991; Finke, 1991). Die Züchtung zunehmend spezialisierter Rassen hat allerdings zu einer Lockerung dieses Zusammenhangs zwischen RMR und Körpergewicht geführt, was zur Folge hat, dass bei Hunden ähnlicher Körpermassen teilweise deutlich unterschiedliche RMR's gemessen wurden (Kienzle and Rainbird, 1991; NRC, 2006a). Bei Tieren mit solch großen Gewichtsunterschieden innerhalb einer Spezies (wie dem Hund), steht der Energiebedarf somit nicht mehr im direkten Zusammenhang zum Körpergewicht. Aus diesem Grund und weil das Verhältnis von Energiebedarf und einer rechnerischen Größe – der sog. metabolischen Körpermasse – deutlich enger ist, wird heute für die Bedarfsberechnung eben das metabolische Körpergewicht herangezogen. Dieses berechnet sich wie folgt: $KG^{0,75}$ (Kleiber, 1947; NRC, 2006a).

1.1.2. Leistungsstoffwechsel

Körperliche Aktivität erfordert Energie. Im Durchschnitt benötigt ein Hund 4,7kJ ME (metabolizable energy, umsetzbare Energie) pro gelaufenen Kilometer (im Schritt), wobei kleinere Rassen eher mehr Energie aufwenden müssen als größere (Zentek and

Meyer, 2005). Die AEE kann je nach körperlicher Aktivität eines Individuums sehr stark variieren und liegt zwischen 5% (bei inaktiven Personen bzw. Tieren) und 50% (bei sehr aktiven Personen bzw. Tieren) der DEE und ist unter anderem abhängig von der Effektivität der jeweiligen Aktivität und vom Körpergewicht (Schutz et al., 2001). Allerdings steht der Leistungsstoffwechsel (v.a. die AEE) bei weitem nicht in so enger Beziehung zum Körpergewicht wie die RMR. Dies scheint an mannigfaltigen speziesspezifischen und individuellen Unterschieden und Anpassungsvorgängen in der respiratorischen Kaskade (Lunge, Herz, Blut, Mikrozirkulation und Mitochondrien) zu liegen (Weibel et al., 2004).

Aber auch andere energieverbrauchende Vorgänge sind „Leistung“ im energetischen Sinne. Beispielsweise Wachstum, Reproduktion, Laktation oder die Aufrechterhaltung der Körpertemperatur. Im thermoneutralen Temperaturbereich benötigen Tiere keine zusätzliche Energie für die Konstanthaltung der Körperinnentemperatur. Der thermoneutrale Bereich kann jedoch auch innerhalb einer Spezies variieren. Beispiel Hund: Huskies: -10 bis +15°C, langhaarige Hunderassen: 15-20°C, kurzhaarige Hunderassen: 20-25°C (Zentek and Meyer, 2005). Eine Absenkung der Umgebungstemperatur von 22°C auf 4-5°C kann den Energiebedarf um 60% steigern (Zentek and Meyer, 2005).

1.1.3. Aerobe Kapazität (aerobic capacity)

Die aerobe Kapazität wird definiert als Verhältnis von Ausdauerstoffwechsel und Ruhestoffwechsel (RMR) (Hammond and Diamond, 1997). Der Ausdauerstoffwechsel oder auch sustained metabolic rate, SusMR, wird definiert als Energiebudget pro Zeit, das ein Tier/Mensch über einen bestimmten Zeitraum aufrecht erhalten kann ohne an Körpermasse zu verlieren (Hammond and Diamond, 1997).

$$\text{aerobe Kapazität} = \frac{\text{SusMR}}{\text{RMR}}$$

Nach Peterson et al. (1990) scheint für dieses Verhältnis ein speziesspezifischer Maximalwert zu existieren, der auch durch Verbesserung aller die Leistung beeinflussender Faktoren (z.B. durch unbegrenztes Futterangebot) nicht überschritten werden kann. Hammond und Diamond (1997) stellten 2 Hypothesen auf, warum ein solcher Maximalwert existieren könnte:

- 1) Die so genannte periphere Limitation, d.h. das jeweils arbeitende Gewebe (z.B. Muskulatur, Milchdrüse etc.) stellt den begrenzenden Faktor dar. Das würde gleichzeitig bedeuten, dass je nach verrichteter Arbeit (Muskelarbeit, Laktation etc.) unterschiedliche Maximalwerte existieren;
- 2) Die so genannte zentrale Limitation, d.h. die zentralen Organe (Herzkreislaufsystem, Lunge, Leber, Magendarmtrakt etc.) können nicht genügend Energie bereitstellen; Das würde wiederum bedeuten, dass ein einziger Maximalwert für jede Art von Leistung existiert.

Weibel et al. (1991) postulierten außerdem noch das „Konzept der Symmorphosis“. Dieses besagt, dass der Körper immer bestrebt ist, nur so viel an Substrat bzw. Energie zu produzieren, wie auch wirklich benötigt wird. Das so genannte „Optimale Design-Modell“ (Bacigalupe and Bozinovic, 2002) stellt eine Kombination aus peripherer und zentraler Limitation dar. Das wiederum hat zur Folge, dass funktionelle Veränderungen immer auch strukturelle nach sich ziehen und umgekehrt.

Die Werte für die aerobe Kapazität variieren stark und reichen von 1,3 bis ca. 12,2 bei Säugern und bis zu 36 bei Vögeln (Bundle et al., 1999; Gerth et al., 2010). Die höchste jemals beim Menschen gemessene aerobe Kapazität (4,3) erreichte 1984 ein Teilnehmer der Tour de France (Westerterp et al., 1986).

1.2. Messung des Energiebedarfs

1.2.1. Indirekte Kalorimetrie (Respirometrie)

Bei der indirekten Kalorimetrie – oder auch Respirometrie – werden der O₂-Verbrauch ($\dot{V}O_2 = O_2 \text{ der Einatemluft} - O_2 \text{ der Ausatemluft}$) und die CO₂-Produktion ($\dot{V}CO_2 = CO_2 \text{ der Ausatemluft} - CO_2 \text{ der Einatemluft}$) gemessen. Diese Methode beruht auf dem Satz von Hess: „Die Reaktionsenthalpie ΔH einer Reaktion ist konstant und unabhängig vom Weg, auf dem diese Reaktion geführt wird.“. Man kann also von den zugeführten Substanzen (der Futterzusammensetzung) auf die Wärmeproduktion eines Tieres und umgekehrt, vom so genannten Respiratorischen Quotienten (RQ, Verhältnis von CO₂-Produktion und O₂-Verbrauch) auf die Zusammensetzung des Futters schließen. So beträgt der RQ bei Kohlenhydraten 1, bei Fetten ca. 0,7 und bei Proteinen ca. 0,81 (von Engelhardt and Breves, 2005; Walsberg and Hoffman, 2005). Diese Berechnung basiert darauf, dass Substrate auf dem Weg der Oxidation verstoffwechselt werden. Vernachlässigt wird hierbei allerdings, dass es auch andere Wege der

Verstoffwechslung gibt, z.B. Lipogenese aus Kohlenhydraten, Gluconeogenese aus Aminosäuren oder auch die Ketogenese aus kurzkettigen Fettsäuren (Schutz, 1997). In „normalen“ Stoffwechselsituationen (also im Falle eines Gleichgewichts zwischen Energieaufnahme und Energieverbrauch bzw. zwischen Energie- und Sauerstoffverbrauch (NRC, 2006b)) kann der Anteil dieser alternativen Stoffwechselwege zwar vernachlässigt werden, aber diese nicht oxidativen Wege des Metabolismus erklären unübliche RQ-Werte.

Die Respirometrie ist eine mittlerweile viel verwendete Methode, da sie (neben der doubly labelled water Methode, bei dieser liegt der abgeschätzte Energieverbrauch um ca. 6% höher als bei der Respirometrie) wohl die genaueste ist (Schoeller and Webb, 1984). Außerdem ermöglicht die indirekte Kalorimetrie eine Aussage über den Energieverbrauch einzelner Stoffwechselsituationen oder körperlicher Aktivitäten. Des Weiteren ist sie nicht invasiv und relativ leicht anzuwenden.

1.2.2. Herzfrequenzmessungen

Die Herzfrequenzmessung als Methode zur Bestimmung des Energiebedarfs basiert auf zwei Annahmen:

- 1) Die Herzfrequenz ändert sich entsprechend eines vermehrten Sauerstoffbedarfs.
- 2) Der Energieverbrauch eines Organismus kann mit Hilfe des Sauerstoffverbrauchs berechnet werden (gewährleistet durch die überwiegend oxidative Verstoffwechslung der Substrate im Körper, s.o.).

Die Herzfrequenzmessung stellt eine relativ einfache und kostengünstige (es können herkömmliche Herzfrequenzsensoren aus dem Humansportbereich verwendet werden) Methode zur Abschätzung des Energiebedarfs dar, da zwischen der Herzfrequenz (HF) und der Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) eine lineare (Butler et al., 1992; Hawkins et al., 2000; Li et al., 1993; Nilssen et al., 1984; Ordway et al., 1984; Payne, 1971; Scharold and Gruber, 1991; Spurr et al., 1988) und (daraus folgernd) zwischen der Herzfrequenz und dem Energieverbrauch (energy expenditure, ee) eine logarithmische Beziehung besteht (Li et al., 1993). Diese Beziehung zwischen HR und $\dot{V}O_2$ basiert auf der Fick'schen Strömungsgleichung:

$$V_{O_2} = HF \times SV(C_aO_2 - C_vO_2)$$

V_{O_2} : Sauerstoffaufnahme [ml/min]

HF: Herzfrequenz [Schläge/min]

| | |
|------------|---|
| SV: | Schlagvolumen des Herzens [ml] |
| C_aO_2 : | Sauerstoffgehalt von arteriellem Blut [vol%] |
| C_vO_2 : | Sauerstoffgehalt von venösem Mischblut [vol%] |

Der Term $SV (C_aO_2 - C_vO_2)$ wird auch als Sauerstoffpuls bezeichnet. Geht man nun davon aus, dass dieser Sauerstoffpuls konstant ist oder sich in vorhersehbarer und systematischer Art und Weise ändert, wird die lineare Beziehung zwischen HF und $\dot{V}O_2$ in der Formel deutlich. Der Sauerstoffpuls bleibt aber in lebenden Individuen in der Regel nicht konstant, vor allem der Sauerstoffgehalt des Blutes ändert sich je nach Aktivität der Tiere teils erheblich. Dadurch wird ein großer Nachteil dieser Methode deutlich: Wird der Term, der den Sauerstoffpuls beschreibt durch eine Konstante ersetzt (was bei der Erstellung einer linearen Regressionsgleichung der Fall ist), können die Ergebnisse ungenau werden. Auch die HF ist nicht nur von der momentan geleisteten Arbeit und dem dadurch entstehenden Energieverbrauch abhängig, sondern wird noch von vielfältigen anderen Faktoren, wie Geschlecht, Alter, Hämatokrit, Trainingsstatus, mentalem Stress, beteiligten Muskelgruppen, Umgebungstemperatur etc. beeinflusst (Green, 2011). Eston et al. (1998) konnten zeigen, dass die Herzfrequenzmethode dazu neigt, bei ansteigender Intensität der Arbeit den $\dot{V}O_2$ und damit den Energieverbrauch zu unterschätzen. Um möglichst genau zu sein, müsste also eine individuelle (zumindest aber rassespezifische) und an die jeweilige Aktivität angepasste Kalibration durchgeführt werden (Butler et al., 2004).

Da die Ermittlung eines individuellen Koeffizienten meist mit einem impraktikablen Aufwand verbunden ist und es mit Hilfe der Herzfrequenzmethode durchaus möglich ist, eine relativ genaue Abschätzung des Energieverbrauchs für (möglichst homogene) Probandengruppen zu liefern, kann die Verwendung eines rasse- bzw. populationspezifischen Koeffizienten einen Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit darstellen. Das wurde bereits bei mehr als 60 Spezies nachgewiesen (Green, 2011): z.B. Fische (Armstrong, 1986; Scharold and Gruber, 1991), Vögel (Bevan et al., 1995; Froget et al., 2001; Froget et al., 2002; Halsey et al., 2009; Hawkins et al., 2000), Wildwiederkäuer (Holter et al., 1976; Nilssen et al., 1984), Herford-Rinder (Brosh et al., 1998), Menschen (Payne, 1971).

1.2.3. Aktivitätsmessungen

Aktivitätsmessungen basieren auf der Erfassung der so genannten Gesamtkörperbeschleunigung oder overall dynamic body acceleration (ODBA), die durch ATP (also Energie)-verbrauchende Bewegung zustande kommt.

Gerade in den letzten Jahren konnten diverse Studien (Halsey et al., 2007; Halsey et al., 2009; van Bouten et al., 1994; Wilson et al., 2006) zeigen, dass die Aktivitätsmessung durch omnidirektionale Beschleunigungssensoren eine relativ genaue Abschätzung des Energieverbrauches erlauben, da zwischen dem $\dot{V}O_2$ und der ODBA eine lineare Beziehung besteht. Der Korrelationskoeffizient für die Beziehung von ODBA und $\dot{V}O_2$ ($R = 0,81$) ist durchaus mit dem für die Beziehung von Herzfrequenz und $\dot{V}O_2$ ($R = 0,73-0,79$) vergleichbar. Kombiniert man beide Methoden, kann sogar ein R von 0,85 erreicht werden (Eston et al., 1998). Halsey et al. (2009) waren die ersten, die diese Methode an verschiedenen zwei- und vierbeinigen Spezies (Mensch, Graugans, Stinktier, Ente, Biber, Pinguin, Gürteltier) in Ruhe und während des Laufens auf einem Laufband validierten. Entsprechend dem HF- $\dot{V}O_2$ -Verhältnis zeigte in dieser Studie auch das ODBA- $\dot{V}O_2$ -Verhältnis erhebliche speziesabhängige Variationen (innerhalb einer Spezies und einer Gangart konnten allerdings problemlos Regressionsgeraden mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,86 und 0,94 erstellt werden. Die Steigung der Regressionsgeraden stieg mit dem Körpergewicht der Individuen). Die Abschätzung des $\dot{V}O_2$ und damit des Energieverbrauches mit Hilfe der Aktivitätsmessung bringt diverse Vorteile mit sich: Die benötigten Datenlogger sind mittlerweile sehr klein und leicht und werden in der Regel auch von Wildtieren problemlos toleriert, ohne sie in ihrem natürlichen Verhaltensmuster einzuschränken; Stress beeinflusst die ODBA nicht maßgeblich (im Gegensatz zur Herzfrequenz!) und die rohen Beschleunigungsdaten lassen zusätzlich ethologische Rückschlüsse zu (Halsey et al., 2009). Ein großer Nachteil hingegen ist, dass der Energieverbrauch während relativ statischer Aktivitäten (v.a. sitzende Tätigkeiten beim Menschen) durch diese Methode teilweise deutlich unterschätzt wird (van Bouten et al., 1994).

2. Effekte von Ausdauertraining

Unter Ausdauertraining versteht man ein Trainingsprogramm, dessen Ziel es ist, die Ausdauer eines Organismus, also dessen Fähigkeit über einen gewissen Zeitraum eine bestimmte Leistung zu erbringen, zu erhöhen. Durch ein solches Training kommt es im Körper zu vielfältigen physiologischen Anpassungsvorgängen, insbesondere im Bereich

des Energiestoffwechsels, in der Muskulatur und im Herzkreislaufsystem. Bei reinem Ausdauertraining funktioniert der Stoffwechsel in der Regel rein aerob. Speziell auf das Herzkreislaufsystem abgestimmt wird Ausdauertraining wie folgt definiert: „Häufiges Aussetzen eines Individuums einer Situation, die eine vermehrte Füllung des linken Ventrikels in Kombination mit einem hohen Schlagvolumen und hohem Herzminutenvolumen hervorruft.“ Krafttraining ist im Gegensatz dazu ein isometrisches Training, das im Herzen vor allem zu einer Druckerhöhung führt (Blomqvist and Saltin, 1983).

Maßgeblichen Einfluss auf die Wirksamkeit von Ausdauertraining haben die Häufigkeit, die Dauer und die Intensität der Übungseinheiten. In der Regel reichen (beim Menschen) drei bis vier Trainingseinheiten pro Woche über mindestens drei Wochen bei einer Intensität von ca. 60% der Maximalleistung, um erste Anpassungsvorgänge des kardiovaskulären Systems zu beobachten (Scheuer and Tipton, 1977).

2.1. Effekte des Trainings auf den Energiestoffwechsel

Trainingseffekte auf den Energiestoffwechsel können verdeutlicht werden, indem die Sauerstoffaufnahme gemessen und daraus der Energieverbrauch berechnet wird. Insbesondere die so genannte maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$) spiegelt die aerobe Leistungsfähigkeit eines Organismus unter Belastung wider.

Die Angaben in der Literatur über den Einfluss von Ausdauertraining auf den Ruhestoffwechsel widersprechen sich teilweise erheblich. Einige Studien – unter anderem am Menschen und an Ratten - zeigen einen Anstieg des Ruhestoffwechsels (Ballor, 1991b; Gleeson et al., 1981; Hill et al., 1984; Peterson et al., 1990), wohingegen andere diesen Effekt nicht bestätigen konnten (Ballor, 1991a; Broeder et al., 1992; Richard et al., 1986; Wickler et al., 1987). Teilweise wurde beim Menschen sogar eine leichte Erniedrigung der Stoffwechselrate beobachtet (Bingham et al., 1988). Wilterdink et al. (1992) konnten am Menschen zeigen, dass der tägliche Energieverbrauch trainierter Individuen deutlich höher lag als der untrainierter. Diese Erhöhung konnte in der erwähnten Arbeit nicht allein durch den Mehrbedarf durch die Trainingseinheit erklärt werden. Vielmehr scheint der Ruhestoffwechsel auch nach dem Training (bis zu 48 Stunden) erhöht zu bleiben. Speakman und Selman (2003) definierten diese nach einer Trainingseinheit erhöhte RMR als EPOC (excess post-exercise O_2 -consumption). Ähnliche Ergebnisse lieferten weitere Studien (Poehlman

and Danforth, 1991). Solche Erhöhungen des Energieumsatzes haben unterschiedliche Ursachen. So kommt es durch das Training zu einer Vermehrung der fettfreien (und damit metabolisch aktiven) Körpermasse (Sharp et al., 1992; Weyer et al., 2000). Außerdem erhöht sich die Kapillaren- und Mitochondriendichte in der Muskulatur (Hawley, 2002; Hoppeler et al., 1984). Weitere mögliche Mechanismen, die hinter der Erhöhung der RMR stecken könnten, wurden von Ballor (1991b) aufgeführt: Aufgrund vermehrter Substratumsetzung kommt es zu einer gesteigerten Thermogenese, die Reparatur bzw. Wiederbefüllung verbrauchter Energiespeicher benötigt Energie, die Shuttle-Mechanismen zeigen eine erhöhte Aktivität, das „Soll-Gewicht“ des Körpers wird herunter reguliert.

Bezüglich des Effektes von Ausdauertraining auf den Leistungsstoffwechsel sind sich die meisten Studien relativ einig: Es kommt zu einer Erhöhung des Leistungsstoffwechsels, sichtbar durch eine Steigerung der maximalen Sauerstoffaufnahme (Broeder et al., 1992; Evans and Rose, 1988; Fagard, 1996; Musch et al., 1985; Proscurshim et al., 1989). Diese Steigerung der maximalen Sauerstoffaufnahme läuft innerhalb speziesspezifischer und individueller Grenzen ab. So können untrainierte Individuen die $\dot{V}O_{2\max}$ in der Regel bis auf das 10fache steigern. Bei „Lauftieren“, also solchen, die speziell für enorme respiratorische Leistungen adaptiert sind (Rennpferde, Windhunde, Antilopen und andere), sind Steigerungen auf das 60fache beschrieben (Weibel et al., 1992). Geht die Intensität der physischen Aktivität darüber hinaus, wird der Mehrbedarf an Energie vor allem über anaerobe Stoffwechselforgänge gedeckt. Zusätzlich findet unter Belastung eine „Umverteilung“ des eingeatmeten Sauerstoffs statt. Fließt dieser nämlich in Ruhe zu ca. 73% in nichtmuskuläre Gewebe (Gehirn, Magendarmtrakt etc.), bekommen Muskulatur und Herz bei körperlicher Aktivität bis zu 90% des Sauerstoffs ab (Weibel et al., 1992).

2.2. Effekte des Trainings auf die Muskulatur

Trotz ihrer enormen Spezialisierung besitzt die Muskulatur von Säugetieren eine bemerkenswerte Anpassungskapazität (Salmons and Henriksson, 1981).

Im Falle einer Massenzunahme der Muskulatur als Antwort auf vermehrte Beanspruchung (v.a. bei Krafttraining) kommt es in der Regel zu einer reinen Hypertrophie, d.h. die erhöhte Muskeldicke rührt allein von einer Volumenzunahme der einzelnen Fasern her. Allerdings können die Myofibrillen ihr Volumen nur in einem bestimmten Rahmen vergrößern, da das Zellkern/Zytoplasma-Verhältnis auch bei

hypertrophen Muskeln konstant bleibt (Boonyarom and Inui, 2006). Solche Massenzunahmen kommen aber in der Regel nicht durch alleiniges Ausdauertraining zu Stande, sondern benötigen eine deutliche Kraftkomponente im Trainingsplan.

Ausdauertraining hat vor allem zum Ziel, die Muskelarbeit über eine gewisse Zeitspanne aufrecht zu erhalten. Das wiederum hängt von der Umsetzungsrate und damit der Schnelligkeit der Umsetzung von Stoffwechselprodukten in Energie ab. Hawley (2002) postulierte deshalb folgende physiologische und metabolische Ziele von Ausdauertraining auf die Muskulatur: Steigerung der Energieproduktion auf aerobem (in geringerem Maße auch auf anaerobem) Weg, Anpassung der ATP-Produktion an den tatsächlichen Verbrauch, Minimalisierung der zellulären Verluste, Maximierung der Bewegungsökonomie und Erhöhung der Widerstandskraft der Muskulatur gegenüber Erschöpfung.

2.3. Effekte des Trainings auf das kardiovaskuläre System

Durch Ausdauertraining kommt es zu physiologischen Anpassungsvorgängen des kardiovaskulären Systems. Hierbei werden zwei verschiedene Mechanismen unterschieden (Dickhuth et al., 1987; Dickhuth et al., 2004):

- Die regulative Anpassung: setzt in der Regel als erstes ein; z.B. erhöhte vasodilatatorische Kapazität, vermehrte Enzymaktivität, erhöhte parasymphatische Aktivität in Ruhe, verzögerte Ansprechbarkeit auf Katecholamine in Ruhe, verzögerte Aktivierung des Sympathikus unter Belastung.
- Die strukturelle Anpassung: setzt ein, falls die Trainingsintensität eine individuelle Grenze überschreitet; kompensatorisches Zellwachstum mit Zunahme der Herzmuskelfaserlänge, Vermehrung der Mitochondrien, Kapillaren und Endothelzellen.

2.3.1. Effekte des Trainings auf die Herzfrequenz

Die Studien über Effekte von Ausdauertraining auf die Herzfrequenz sind sich relativ einig. So kommt es nach Ausdauertraining (die Dauer des Trainings war von Studie zu Studie unterschiedlich und reichte von neun bis zehn Wochen bis hin zu mehreren Jahren bei Marathonläufern) zu einer Erniedrigung der Ruheherzfrequenz und der Herzfrequenz unter submaximaler Belastung (Barnard et al., 1980; Billman and Kukielka, 2007; Bingham et al., 1988; Fagard, 1996; Ventura-Clapier et al., 2007). Bei

Spitzensportlern werden grundsätzlich Ruheherzfrequenzen gemessen, die 15 bis 20 Schläge unter der untrainierter Menschen liegen (Scheuer and Tipton, 1977). Der Mechanismus, der hinter dieser Absenkung der Herzfrequenz steckt, scheint vor allem auf einer Aktivierung des parasympathischen Systems bei gleichzeitig vermehrter Inaktivität des Sympathikus zu basieren (MacMillan et al., 2006). Blomqvist und Saltin (1983) führten diesen Effekt zusätzlich auf ein erhöhtes Schlagvolumen und eine erniedrigte Sensibilität des Sinusknotens zurück. Auch bei Hunden wurde eine Erniedrigung der Ruheherzfrequenz bzw. der Herzfrequenz unter submaximaler Belastung schon bewiesen (Billman and Kukielka, 2007). Einige Studien konnten allerdings lediglich eine Erniedrigung der Herzfrequenz unter submaximaler Belastung, jedoch nicht in Ruhe nachweisen (Bove et al., 1979; Mackintosh et al., 1983; Stone, 1977). Auf diesem Gebiet besteht also nach wie vor Bedarf an weiteren Studien, um diese teilweisen Widersprüche aufzuklären.

2.3.2. Effekte des Trainings auf die Herzstruktur

Beim Menschen werden zwei Arten eines Sportlerherzens unterschieden: ein ausdauertrainiertes und ein krafttrainiertes Herz. Bei krafttrainierten Herzen kommt es zu signifikant deutlicheren Veränderungen der Herzmorphologie als beim ausdauertrainierten Herzen. Bei einem Krafttraining beruht die Mehrbelastung des Herzens vor allem auf einer Druckerhöhung, die zu einer Wanddickenzunahme bei unverändertem Ventrikeldurchmesser führt (so genannte konzentrische Hypertrophie), wohingegen Ausdauertraining vor allem eine Volumenüberladung bewirkt (so genannte exzentrischen Hypertrophie). In der Regel können allerdings Mischformen aus konzentrischer und exzentrischer Hypertrophie beobachtet werden, da meist Krafttraining auch eine Ausdauerkomponente aufweist und umgekehrt (Pluim et al., 2000). Bestes Beispiel hierfür lieferte eine Studie von Stepien et al. (1998) an Schlittenhunden. Die Arbeit dieser Tiere ist eine typische Kombination aus isometrischem und isotonischem Training. In diesem Fall kam es zu einer Erniedrigung der Ruheherzfrequenzen, einer Verdickung der Wände des Septums und des linken Ventrikels und einer Erhöhung des Ventrikeldurchmessers.

Über die Effekte von Ausdauertraining auf die Herzstruktur existieren diverse Studien bei Mensch und Tier, deren Ergebnisse sich teilweise widersprechen. In einigen konnte eine Zunahme der Wanddicken des Ventrikels und des Septums beobachtet werden (Barnard et al., 1980; Fagard, 1996; Stepien et al., 1998; Wyatt and Mitchell, 1974), in anderen allerdings nicht (Gerth, 2010; Maron, 1986; Ruoss, 2011).

2.3.3. Effekte des Trainings auf die Herzleistung

Bezüglich des Einflusses von Ausdauertraining auf die Herzfunktion existieren unterschiedliche Studienergebnisse. Teilweise konnte sowohl beim Menschen als auch bei anderen Säugetieren durch das Training eine Erhöhung des Schlagvolumens in Ruhe und unter Belastung erreicht werden (Barnard et al., 1980; Dickhuth et al., 1987; Evans and Rose, 1988; Fagard, 1996; Ritzer et al., 1980; Schaible and Scheuer, 1979; Stone, 1977). Diese Erhöhung wird unter anderem auf die durch Training erniedrigte Herzfrequenz zurückgeführt, da das Herz langsamer arbeitet und somit mehr Zeit hat, um sich zu füllen. Dadurch steigt das enddiastolische Volumen und daraus folgernd das Schlagvolumen. Zumindest beim Menschen zeigen Studien aber, dass es unter Belastung auch zu einer Abnahme des Schlagvolumens kommen kann (Fritzsche et al., 1999). Diese Absenkung des Schlagvolumens stand in der erwähnten Studie immer im direkten Zusammenhang mit einer Erhöhung der Herzfrequenz, was dazu führte, dass die Auswurfleistung des Herzens letzten Endes konstant blieb.

Bei der Untersuchung des Trainingseffektes auf Ejektionsfraktion und Verkürzungsfraktion sind sich die Studien hingegen relativ einig. Es kommt meist zu keiner statistisch signifikanten Veränderung (Dickhuth et al., 1987; Fagard, 1996; Gilbert et al., 1977; Pluim et al., 2000; Scheuer and Tipton, 1977). Wenige Studien konnten allerdings einen Effekt auf diese Herzleistungsparameter zeigen (Gerth, 2010; Schaible and Scheuer, 1979).

Zusammenfassend zeigte eine Studie von Ritzer et al. (1980) an Hunden (Beagle), dass es durch Ausdauertraining wohl eher zu einer Verbesserung der Herzfunktion und weniger zu einer strukturellen Anpassung des Herzens kommt, da die hierfür benötigten Druckbelastungen bei reiner Laufarbeit nicht ausreichend sind. Eine Verbesserung der Herzfunktion scheint also unbestritten. Ob diese jedoch durch eine reine Muskelmassenzunahme, eine Verbesserung der Substratausnutzung oder eine Veränderung auf genomischer Ebene zustande kommt, ist nach wie vor ungeklärt (Ventura-Clapier et al., 2007).

2.4. Effekte des Trainings auf die freie Aktivität

Beim Menschen scheint Training altersabhängigen Einfluss auf die freie Aktivität zu haben. So verändert sich diese bei jungen Leuten kaum (bei gleichzeitiger Erhöhung des Energieverbrauches), ältere Menschen gleichen die vermehrte Bewegung durch das Training allerdings durch eine vermehrte Inaktivität während des restlichen Tages aus

(Westerterp, 2008). Auch bei Marathonläufern konnte (abgesehen von der vermehrten Aktivität während des Trainings) keine Erhöhung der freien Aktivität beobachtet werden (Meijer et al., 1990). Der Autorin ist nur eine Studie bekannt, in denen der Einfluss von Ausdauertraining auf die freie Aktivität von Hunden untersucht wurde (Ruoss, 2011). In dieser Arbeit konnte ein mit den älteren Menschen vergleichbarer Effekt von Training auf die freie Aktivität beobachtet werden: Die Hunde waren während der Trainingsphase signifikant weniger aktiv und kompensierten somit die Mehrbelastung durch die Laufbandeinheiten. Kein Unterschied ergab sich allerdings, wenn untrainierte und trainierte Hunde in der trainingsfreien Zeit verglichen wurden.

3. Reversibilität der Trainingseffekte

Bei der Erforschung von Trainingseffekten auf den tierischen bzw. menschlichen Organismus stellt sich immer auch die Frage nach der Reversibilität funktioneller und/oder struktureller Anpassungsvorgänge.

3.1. Reversibilität der Veränderungen des Energiestoffwechsels

In einer Studie von Coyle et al. (1984) wurde der Verlust der physiologischen Anpassungen an jahrelanges Ausdauertraining an sieben Sportlern untersucht. Die Messungen fanden jeweils 12, 21, 56 und 84 Tage nach Einstellung sämtlicher Trainingsaktivitäten statt. Insbesondere wurden dabei die Veränderungen der Herzfrequenzen, der maximalen Sauerstoffaufnahme, des Schlagvolumens, der Kapillarisdichte der Muskulatur und des Gehalts an oxidativen Enzymen in der Muskulatur beobachtet. Das Schlagvolumen sank schon im ersten Abschnitt der trainingslosen Zeit auf ein Level, das sich statistisch nicht von einer „unsportlichen“ Kontrollgruppe unterschied (10%-14% unterhalb des trainierten Wertes). Auch bei den maximalen Herzfrequenzen kam es relativ schnell zu einem Rückgang der Anpassungsvorgänge. Anders bei der maximalen Sauerstoffaufnahme und der Veränderungen in der Muskulatur: Die maximale Sauerstoffaufnahme sank in den ersten 12 Tagen um 7%, zwischen dem 12. und 21. Tag nicht mehr und stabilisierte sich nach 56 Tagen auf einem Level, das 16% niedriger lag als die Ausgangswerte. Nichtsdestotrotz lagen die „detrainierten“ Werte immer noch statistisch signifikant über jenen der Kontrollgruppe. Ähnliches konnte auch bei der Kapillarisierung der Muskulatur beobachtet werden. Diese parallel verlaufenden Veränderungen der

maximalen Sauerstoffaufnahme und der Kapillarisation der Muskulatur deuten darauf hin, dass (zumindest ein Teil) der Steigerung der Sauerstoffaufnahme auf eine erhöhte Kapillarisation zurück zu führen ist. Die meisten Studien beschreiben bezüglich der maximalen Sauerstoffaufnahme ähnliche Ergebnisse, unter anderem auch beim Hund (Klausen et al., 1981; Tipton et al., 1974), allerdings existieren auch Arbeiten, bei denen in den ersten 6 Wochen der Inaktivität keine Veränderungen der maximalen Sauerstoffaufnahme beobachtet werden konnte (Henriksson and Reitman, 1977) oder andere, in denen es nach einer zweimonatigen trainingsfreien Zeit zu einem vollständigen Rückgang der maximalen Sauerstoffaufnahme bis hin zum Ausgangslevel kam (Proscurshim et al., 1989).

3.2. Reversibilität der Veränderungen der Muskulatur

Wird die Muskulatur weniger – oder beispielsweise im Falle einer Verletzung gar nicht mehr – beansprucht, kommt es relativ rasch zu einer Abnahme der Muskelmasse bis hin zur Atrophie (Hoppeler and Flück, 2002). Auch die strukturellen Anpassungen des Muskels (wie z.B. die vermehrte Kapillarisation, erhöhte Mitochondriendichte, erhöhte Enzymaktivität etc.) sind bereits nach 4 Wochen der Inaktivität der Muskulatur teilweise und nach 8 Wochen vollständig reversibel (Coyle et al., 1984; Klausen et al., 1981).

3.3. Reversibilität der Veränderungen am Herzen

Diverse Studien konnten zeigen, dass sämtliche funktionellen und strukturellen Anpassungsvorgänge am Herzen ganz oder zumindest teilweise reversibel sind. Lediglich die Zeitspanne der Inaktivität, die dafür benötigt wird, unterscheidet sich. Beispielsweise konnten Ehsani et al. (1978) und Hickson et al. (1979) bereits nach einer Woche die Reversibilität struktureller und funktioneller Anpassungen des Herzens beobachten, Shapiro und Smith (1983) dagegen erst nach 6 Wochen. Eine wichtige Rolle bei der Entscheidung, ob und wie schnell sich die physiologischen Anpassungsvorgänge zurückbilden, scheint die Dauer zu sein, während der diese Veränderungen schon bestanden haben. Je länger das Tier bzw. der Mensch also trainiert hat, umso länger benötigen die Rückbildungsvorgänge und umso unvollständiger laufen sie ab (Dickhuth et al., 2004). Studien am Menschen konnten außerdem keinerlei Rückbildungsvorgänge nach dauerhafter (teilweise

verletzungsbedingter) Beendigung jahrelangen intensiven Trainings beobachten (Blomqvist and Saltin, 1983). Auch Scheuer und Tipton berichten von einer persistierenden Kardiomegalie auch nach Jahren der Inaktivität (1977).

III. Arbeitshypothesen

1. Korrelation zwischen Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch

Die Herzfrequenzmessung ist eine einfache und kostengünstige Methode, um den Energiebedarf eines Tieres zu ermitteln. Diese Herangehensweise hat damit großes Potenzial, um routinemäßig zur Ermittlung des Energiebedarfs eingesetzt zu werden. Zwei aktuelle Studien konnten bereits eine lineare Korrelation zwischen der Herzfrequenz und dem Sauerstoffverbrauch bei FBI-Hunden (Foxhound-Boxer-Ingelheim-Labrador-Mischlinge) nachweisen (Beyreuther, 2007; Ruoss, 2011). Da aber, wie bereits erwähnt, unter anderem die Körpermasse für den Energieverbrauch und die Herzfrequenz eine große Rolle spielt (Kleiber, 1947; Mai, 2006), wäre eine individuelle Regressionsgleichung mit Sicherheit die genaueste, aber wohl impraktikable Möglichkeit der Energieabschätzung. Deshalb ist die Verwendung eines rassespezifischen Koeffizienten ein akzeptabler Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit.

Eines der Ziele dieser Arbeit war also die Klärung der Frage, ob es einen Rasse- und/oder Größeneinfluss auf diese Korrelation gibt und die Erstellung einer Regressionsgleichung für Hunde kleiner bis mittelgroßer Rassen (in diesem Fall Beagle), um damit eine Abschätzung des individuellen Energiebedarfes zu ermöglichen.

2. Effekte langfristigen Ausdauertrainings

Die Studien über die Effekte von Ausdauertraining auf den Energiestoffwechsel und die Herzmorphologie bzw. -funktion widersprechen sich teilweise erheblich. Nur in wenigen Studien wurde ein rein auf Ausdauer angelegtes Training durchgeführt (meistens wurde eine Steigung des Laufbandes, also eine Kraftkomponente mit eingebaut). Hinzu kommt, dass die meisten Arbeiten ein relativ kurzes Training vorgesehen hatten.

Ein Ziel dieses Forschungsprojektes war es, den Effekt eines langfristigen, rein auf Ausdauer ausgelegten Trainings, unter kontrollierten und systematischen Trainingsbedingungen zu untersuchen. Insbesondere wurden Veränderungen folgender Parameter untersucht:

- Energiestoffwechsel: Ausdauertraining bewirkt in vielen Studien (beim Menschen) eine Erhöhung des Ruhestoffwechsels. Wir erwarteten also auch bei

Haushunden, dass langfristiges Ausdauertraining ebenfalls zu einer statistisch signifikanten Erhöhung des Ruhestoffwechsels führt.

- Muskeldicke: Eine Zunahme des Muskelquerschnittes konnte bis jetzt vor allem bei Trainingsprogrammen mit Schwerpunkt auf der Kraftkomponente beobachtet werden. Somit war in dieser Studie, in der reines Ausdauertraining durchgeführt wurde, nicht mit einer Muskeldickenzunahme zu rechnen.
- Kardiovaskuläres System: Langfristiges Ausdauertraining hat am menschlichen Herzen deutliche morphologische und funktionelle Veränderungen zur Folge (Dickenzunahme der Ventrikelwand und des Septums, vergrößerter Ventrikeldurchmesser und damit verbunden ein erhöhtes Schlagvolumen). Ähnliche Umbauvorgänge wurden im Rahmen dieser Studie auch beim Hund erwartet.
- Freie Aktivität: Da die freie Aktivität in engem Zusammenhang zum natürlichen Verhaltensmuster eines Tieres bzw. des Menschen steht und dieses zwischen Mensch und Hund nicht zu vergleichen ist, waren beim Hund nicht unbedingt Ergebnisse zu erwarten, die denen beim Menschen entsprechen. Nichtsdestotrotz konnte in der bislang einzigen Studie an Hunden auf diesem Gebiet (Ruoss, 2011) ein ähnlicher Effekt – nämlich eine Kompensation der trainingsbedingten Mehraktivität durch vermehrte Ruhezeiten – gezeigt werden. Ein weiteres Ziel dieser Studie war also die Klärung der Frage, ob diese Ergebnisse reproduzierbar sind.

3. Reversibilität physiologischer Trainingsanpassungen

Beim Menschen konnte bereits in mehreren Studien gezeigt werden, dass selbst nach langjährigem Training bereits nach einer mehrwöchigen oder –monatigen Phase der Inaktivität die physiologischen Anpassungsvorgänge ganz oder teilweise reversibel waren. Da in der vorliegenden Studie ein „nur“ 16-wöchiges und relativ moderates Training durchgeführt wurde und das Ausmaß und die Geschwindigkeit der Rückbildungsprozesse von der Dauer des Bestehens der Veränderungen und der Intensität des Trainings abhängen, war mit einer relativ raschen und vollständigen Rückbildung aller physiologischer Anpassungen zu rechnen.

IV. Material und Methoden

1. Tiere

1.1. Versuchstiere

In der Versuchsgruppe befanden sich 10 weiblich intakte, gesunde Beagle. Das Alter der Tiere lag zu Beginn des Versuches zwischen 12 und 30 ($16,9 \pm 6,3$) Monaten.

Vor dem Start der ersten Messphase wurden die Hunde einer gründlichen Allgemeinuntersuchung unterzogen. Diese Untersuchung beinhaltete folgende Parameter:

Beurteilung von Körperhaltung, Verhalten und Schleimhautfarbe; Messung der Körpertemperatur, der Atemfrequenz, der Herzfrequenz und der kapillären Füllungszeit;

Palpation der peripheren Lymphknoten; Auskultation von Herz und Lunge;

Zusätzlich wurde ein großes Blutbild und eine klinische Chemie erstellt.

Anhand dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass alle Hunde bei ungestörtem Allgemeinbefinden und klinisch gesund in den Versuch starteten. Im Vorfeld wurde nach §8 Abs. 1 des Tierschutzgesetzes ein Antrag auf Genehmigung des Tierversuches gestellt, der von der Tierschutzbeauftragten der Fakultät und der zuständigen Behörde (Regierung von Oberbayern) bewilligt (AZ 55.2-1-54-2531-67-10) wurde.

1.2. Tierhaltung und -fütterung

Die Hunde verbrachten die gesamte Versuchsphase in einer gewohnten kombinierten Haltung aus Innenboxen und ca. 30 qm großen Außenausläufen. Im Freien befanden sich die Tiere täglich von 8 bis ca. 15 Uhr. In den Ausläufen, die die Hunde jeweils in Gruppen von drei bis fünf Tieren nutzten, standen während des gesamten Aufenthalts Hundehütten und frisches Wasser zur Verfügung. Den Abend und die Nacht verbrachten die Tiere in den klimatisierten Innenzwingern, die mit eingestreuten Liegebereichen und frischem Wasser ausgestattet waren. Mit einer Ausnahme waren die Hunde auch im Innenbereich in kleinen Gruppen von zwei bis drei Hunden untergebracht.

Während des gesamten Versuchszeitraumes erhielten die Tiere morgens ein kommerzielles Alleinfuttermittel für Hunde (trocken, z.T. auch feucht) in einer Menge, die dem individuellen Energiebedarf entsprach. Als Kenngrößen der Futterzuteilung

dienten Körpermasse und der individuelle Body Condition Score (angestrebt war ein BCS von 4-5 von 9). Bei Bedarf wurde die Futtermenge angepasst.

2. Versuchsaufbau

Der Versuch gliederte sich in sechs Phasen (Abbildung 1).

- **Gewöhnungsphase:** Tag 1 bis 105 (03.05.2010 bis 15.08.2010)
Dieser Abschnitt des Versuchs nahm einen Zeitraum von 15 Wochen in Anspruch und diente vor allem der Gewöhnung der Hunde an das stressfreie Laufen auf dem Laufband und das Tragen der Messausrüstung.
- **Messphase 1 (untrainiert I):** Tag 106 bis 155 (16.08.2010 bis 03.10.2010)
Die erste Messphase nahm sieben Wochen in Anspruch. Zur Messroutine gehörten die Respirometrie, EKG, Echokardiographie, Muskelultraschall und die Erfassung des Body Condition Scores und des aktuellen Körpergewichts.
- **Trainingsphase:** Tag 155 bis 267 (04.10.2010 bis 23.01.2011)
Die Dauer des Trainings betrug 16 Wochen.
- **Messphase 2 (trainiert):** Tag 267 bis 295 (24.01.2011 bis 20.02.2011)
Die zweite Messphase nahm vier Wochen in Anspruch. Zur Messroutine gehörten die Respirometrie, EKG, Echokardiographie, Muskelultraschall und die Erfassung des Body Condition Scores und des aktuellen Körpergewichts.
- **Trainingsfreie Zeit:** Tag 295 bis 381 (21.02.2011 bis 17.5.2011)
Die Phase der trainingsfreien Zeit zog sich über 12 Wochen. Während dieser Zeit absolvierten die Hunde keinerlei Trainingseinheiten und waren in gewohnter Haltungsumgebung untergebracht. Ziel war das Erreichen des konditionellen Ausgangszustands.
- **Messphase 3 (untrainiert II):** Tag 381 bis 407 (18.5.2011 bis 12.6.2011)
Die dritte Messphase nahm vier Wochen in Anspruch. Zur Messroutine gehörten die Respirometrie, EKG, Echokardiographie, Muskelultraschall und die Erfassung des Body Condition Scores und des aktuellen Körpergewichts.

Zusätzlich zu den Messungen in den einzelnen Messphasen, wurden während des gesamten Versuchszeitraumes Außen- bzw. Stalltemperatur- und Aktivitätsaufzeichnungen durchgeführt.

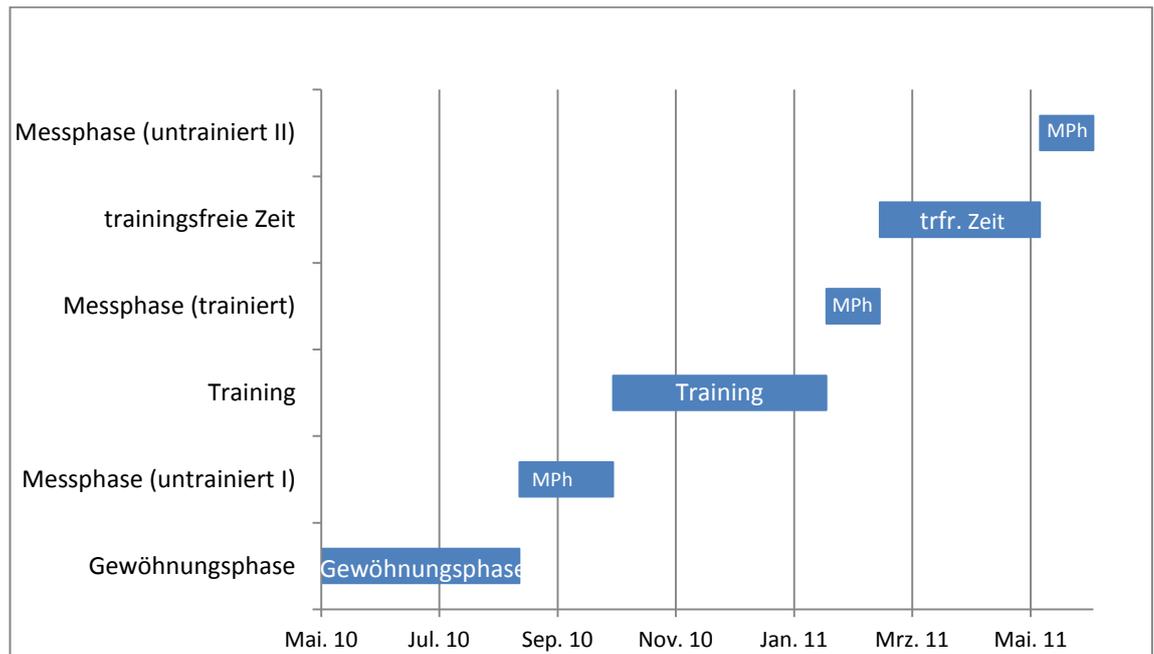


Abbildung 1: zeitlicher Ablauf des Versuches: Gewöhnungsphase, Messphase untrainiert I (MPh), Training, Messphase trainiert (MPh), trainingsfreie Zeit (trfr. Zeit), Messphase untrainiert II (MPh).

3. Trainingsplan

Der Trainingsplan wurde speziell für diesen Versuch entwickelt, aber an vorangegangene Versuche angelehnt (Beyreuther, 2007; Ruoss, 2011). Das Training beinhaltete drei Trainingseinheiten auf dem Laufband pro Woche, jeweils unterbrochen von mindestens einem Erholungstag.

Es wurden drei unterschiedliche Trainingsarten angewendet:

- **Grundlagentraining:**

Die Hunde liefen 40 Minuten lang eine konstante Geschwindigkeit. Diese Trainingsart beruht auf dem Arbeiten ausschließlich im aeroben Bereich. Die Geschwindigkeit war zu Beginn der Trainingsphase relativ gering (5km/h), wurde aber mit zunehmender Kondition der Beagles über einen Zeitraum von sechs Wochen auf schlussendlich 8km/h erhöht (Tabelle 1).

Tabelle 1: gelaufene Geschwindigkeiten im Grundlagentraining.

| Trainingswoche | Geschwindigkeit im Grundlagentraining |
|-----------------------|--|
| 1 | 5,0 km/h |
| 2 | 5,5 km/h |
| 3 | 6,0 km/h |
| 4 | 7,0 km/h |
| 5 | 7,0 km/h |
| 6 | 7,5 km/h |
| 7-16 | 8,0 km/h |

- **Extensives Intervalltraining:**

Hierbei wurde zwischen schnellen und langsamen Laufphasen gewechselt. Das extensive Intervalltraining bestand aus 5 schnellen Intervallen a 2 Minuten, jeweils unterbrochen von gleichlangen, langsamen Phasen (Abbildung 2). Die Geschwindigkeit während der langsamen Intervalle betrug über die gesamte Trainingsphase hinweg 5 km/h, die der schnellen Intervalle wurde im Laufe des Trainings erhöht. Das erste Intervalltraining wurde mit 10km/h begonnen, das zweite mit 12km/h, das dritte mit 12,5km/h und ab dem vierten Intervalltraining liefen die Hunde 13km/h.

Diese Art des Trainings eignet sich ideal für eine Verbesserung der Ausdauer, da der Körper auch in den langsamen Intervallen nie ganz den Ausgangs- bzw. Ruhezustand erreicht, es kommt also nicht zur vollständigen Erholung. Das führt zu einem besonders intensiven Training des Herz-Kreislaufsystems.

Mit Ein- und Auslaufen betrug die Gesamtdauer des extensiven Intervalltrainings ca. 25 Minuten.

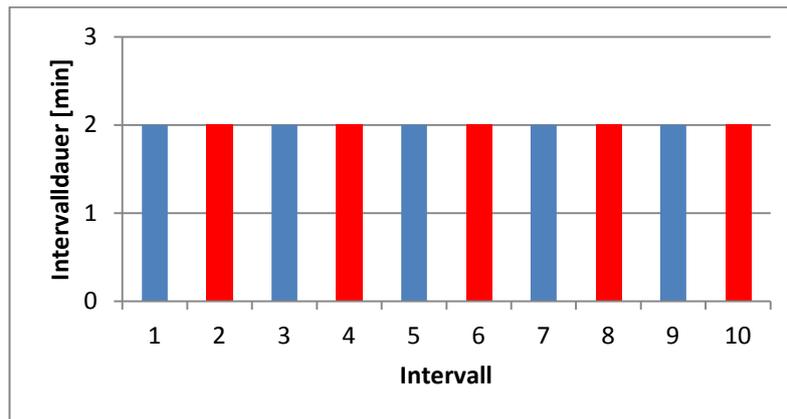


Abbildung 2: Aufbau des extensiven Intervalltrainings mit langsamen Intervallen (blaue Balken) und schnellen Intervallen (rote Balken).

- Pyramidentraining:

Das Pyramidentraining ist eine besondere Art des Intervalltrainings, bei der die Intervalle in ihrer Dauer auf- und wieder absteigen. Die Geschwindigkeiten betragen analog zum extensiven Intervalltraining 5km/h bzw. 10-13km/h (die schnelleren Geschwindigkeiten wurden beim Pyramidentraining Woche für Woche um jeweils 1km/h erhöht). Die Intervalldauer begann bei jeder Trainingseinheit mit einer Minute und wurde Intervall für Intervall auf bis zu vier Minuten verlängert, um dann Stück für Stück wieder auf eine Minute verringert zu werden (Abbildung 3). Diese Art des Intervalltrainings ist ideal für Individuen mit einer gewissen Grundfitness geeignet, da die Intensität des „normalen“ Intervalltrainings durch die verschieden langen Intervalle noch deutlich gesteigert werden kann.

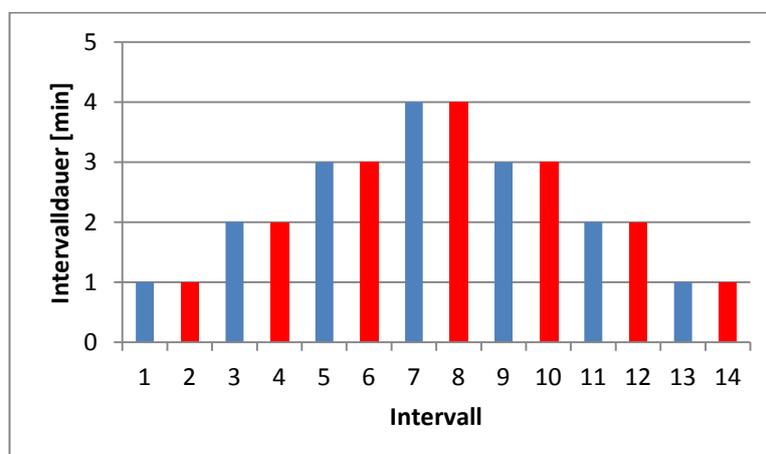


Abbildung 3: Aufbau des Pyramidentrainings mit langsamen (blaue Balken) und schnellen (rote Balken) Intervallen.

Zu Beginn der Trainingsphase bestanden alle drei Laufbandeinheiten pro Woche ausschließlich aus Grundlagentraining, ab der 5. Woche wurde zuerst das extensive Intervall- und ab der 9. Woche schließlich auch das Pyramidentraining in die Übungsroutine eingebaut (Tabelle 2). Um einen eventuellen Trainingseffekt zu sehen, wurden ca. alle 6 Wochen Zwischenmessungen in Form von Schwellentest (siehe Kapitel IV.6.2.) durchgeführt.

Tabelle 2: Verteilung der verschiedenen Trainingsarten über den gesamten Trainingszeitraum. Grundlagentraining (GLT), Extensives Intervalltraining (EIT) Pyramidentraining (PT) und Schwellentests (ST).

| <i>Trainingsart</i> | <i>GLT</i> | <i>EIT</i> | <i>PT</i> | <i>ST</i> |
|---------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| <i>1. Woche</i> | 3x | | | |
| <i>2. Woche</i> | 3x | | | |
| <i>3. Woche</i> | 3x | | | |
| <i>4. Woche</i> | 3x | | | |
| <i>5. Woche</i> | 1x | 2x | | |
| <i>6. Woche</i> | 2x | | | 1x |
| <i>7. Woche</i> | 1x | 2x | | |
| <i>8. Woche</i> | 1x | 2x | | |
| <i>9. Woche</i> | 2x | | 1x | |
| <i>10. Woche</i> | 1x | 1x | 1x | |
| <i>11. Woche</i> | 1x | 1x | 1x | |
| <i>12. Woche</i> | 1x | 1x | | 1x |
| <i>13. Woche</i> | 1x | 1x | 1x | |
| <i>14. Woche</i> | 1x | 1x | 1x | |
| <i>15. Woche</i> | 1x | 1x | 1x | |
| <i>16. Woche</i> | 2x | 1x | | |

4. Laufband

Bei dem im Versuch verwendeten Laufband handelt es sich um eine Sonderanfertigung (WT-Metall, Bamberg, Deutschland). Die Lauffläche ist mit 5 mal 0,8 Metern besonders lang und breit, die Steigung ist elektrisch von 0 bis ca. 20° verstellbar (während des Versuches wurde diese Möglichkeit der Trainingsintensivierung allerdings nicht genutzt). Auf der linken Seite ist das Laufband durch eine ca. ein Meter

hohe Wand abgeschlossen, rechts befindet sich ein ca. ein Meter hohes Sichtgitter. Am hinteren Ende der Lauffläche ist außerdem eine Lichtschranke angebracht, bei deren Durchschreiten der Motor sofort stoppt.

Die Geschwindigkeitsregulierung erfolgt mittels Drehschalter am vorderen Ende des Laufbandes. Um eine möglichst exakte Schnelligkeitseinstellung zu gewährleisten, wurde ein Fahrradtachometer mit dem Laufband verbunden, so, dass jederzeit die Geschwindigkeit in Kilometer pro Stunde (auf ein Zehntel genau) abgelesen werden kann. Die Höchstgeschwindigkeit dieser Sonderanfertigung liegt bei ca. 18km/h.

Während aller auf dem Laufband stattfindenden Messungen und während des Trainings wurde den Hunden ein Geschirr (Webmaster Harness S, Ruffwear, Bend, Oregon) angelegt mit dem sie an einer längs über der Lauffläche verlaufenden Kette befestigt wurden. Damit wurde eine Sicherung der Hunde bei gleichzeitig bestehender Bewegungsfreiheit gewährleistet.

Das Laufband stand während des gesamten Versuchszeitraumes in dem gleichen Stallgebäude, in dem die Versuchstiere untergebracht waren. Vorteile hier waren Klimatisierung und Belüftung und somit die Konstanthaltung der Umgebungsbedingungen, sowie die bestehende Gewöhnung an die Räumlichkeit.

5. Windmaschine

Um die Thermoregulation der Hunde während des Tragens der Respirometriemaske zu unterstützen und ein Gefühl des Laufens im Freien zu simulieren, wurde an der Stirnseite des Laufbandes in 50cm Entfernung eine fahrbare Windmaschine (Trotec, TTW 25000 S, Heinsberg, Deutschland) installiert (maximale Luftmenge: 25.000m³/h, maximale Rotordrehzahl: 685/min).

Mit Hilfe eines am Laufband angebrachten Steuerelementes kann die Windstärke stufenlos verstellt und somit der Laufgeschwindigkeit des Hundes angepasst werden. Die Kontrolle der Windstärke erfolgte mittels eines kleinen tragbaren Windmessgerätes (Windmaster 2, Kaindl Elektronik, Rohrbach, Deutschland).

6. Durchgeführte Messungen

Herzfrequenzmessungen, Respirometrie sowie Ruhe- und Belastungs-EKG wurden an nüchternen Tieren (letzte Mahlzeit vor mindestens 12 Stunden) vorgenommen. Die Messungen eines Tages erfolgten in immer der gleichen Reihenfolge, so dass

gewährleistet war, dass die Ergebnisse nicht durch tageszeitliche Schwankungen beeinflusst werden.

6.1. Herzfrequenzmessungen

6.1.1. Verwendete Geräte

Die Herzfrequenz der Hunde wurde mit Hilfe des für den Fitnesssport beim Menschen entwickelten Polar Trainingscomputers (S610i, Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland) gemessen. Das System besteht aus drei Teilen:

Einem elastischen Brustgurt (Polar WearLink mit eingebautem Sender), der die Herzfrequenzen in Echtzeit misst; einer Armbanduhr, die die gemessenen Herzfrequenzen anzeigt und aufzeichnet; und schließlich einer Software (Polar Precision Performance SW) mit Infrarot-USB-Stick, die das Auslesen und anschließende Bearbeiten der gespeicherten Daten mit Hilfe eines PCs oder Laptops ermöglicht.

Die Herzfrequenzmessung durch den im Brustgurt eingebauten Sender erfolgt kontinuierlich, die Aufzeichnungsintervalle können je nach Bedarf individuell festgelegt werden (für diese Studie wurde ein Intervall von 5 Sekunden gewählt).

6.1.2. Durchführung der Herzfrequenzmessungen

Die Herzfrequenzmessungen wurden jeweils parallel zu den respirometrischen Messungen und zusätzlich einmal wöchentlich während des Trainings durchgeführt. Die Hunde trugen hierfür den Empfänger, befestigt an einem eigens hierfür hergestellten Halsband, um den Hals und den Brustgurt analog zum Menschen um die Brust geschnallt. Um die elektrische Leitfähigkeit zu verbessern, ohne die Herzregion der Tiere scheren zu müssen, wurde auf den Gurt und die Brustwand der Hunde ein Gel (Gelbildner PNC 400, OMIKRON GmbH Naturwaren, Neckarwestheim, Deutschland) aufgetragen.

6.1.3. Erhebung der Daten der Herzfrequenzmessungen

Die Herzfrequenzen wurden jeweils parallel zu den respirometrischen Messungen in fünf Sekunden Intervallen aufgezeichnet. Da die Daten des Respirometrieegerätes alle 10 Sekunden abgespeichert wurden, mussten zunächst für alle Herzfrequenzen die 10-Sekunden-Mittelwerte gebildet werden. Die restliche Auswertung erfolgte analog zu der der respirometrischen Messdaten.

6.2. Spirometrie

6.2.1. Verwendete Geräte

Die spirometrischen Messungen wurden mit einem normalerweise in der Humanphysiologie verwendeten Spirometrieerat MetaMax 3X (Version MMX3X 2.1, Cortex Biomedical GmbH, Leipzig, Deutschland) durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein tragbares Spirometrie-Gerät mit offenem System.

An den Gehäuseschalen befinden sich Anschlussstellen für die externe Batterie, einen PC, Sensoren (Tabelle 3) und eine Absaugstrecke.

Tabelle 3: Sensortypen des MetaMax-Gerätes

| | Messbereich | Genauigkeit | Reaktionszeit |
|------------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| Volumensensor | 0,05 bis 20l/s | 2% | |
| O₂-Sensor | 0 bis 60% O ₂ | 0,1Vol% | ≤0,5sec |
| CO₂-Sensor | 0 bis 13% CO ₂ | 0,1Vol% | ≤0,5sec |
| Temperatursensor | -55°C bis +155°C | 1°C | |
| Drucksensor | 200 bis 1050mbar | 1,8% | |

Des Weiteren gehört zur Ausstattung des Gerätes ein Telemetrie-Empfänger, dessen Reichweite bis zu 1000 Meter umfasst und somit eine kabellose Echtzeitdatenubertragung ermöglicht. Dieser Empfänger wird über eine RS 232-Schnittstelle direkt an PC oder Notebook angeschlossen.

Bei den verwendeten Batterien handelt es sich um Lithium-Ion-Akkus mit einer Kapazität von 1850 Milliampere, einer Spannung von 7,2 Volt und einer Leistungsdauer von ca. drei Stunden.

Die zugehörige Software wurde an die speziellen Bedingungen der Spirometrie bei Hunden angepasst, indem die Empfindlichkeit des Volumensensors auf ein minimales Atemvolumen von 100ml herabgesetzt und die maximal zu messende Atemfrequenz auf 240 pro Minute heraufgesetzt wurde.

Im Vorfeld jeder Messphase und einmal wöchentlich im Laufe jeder Messphase wurden Druck-, Volumen- und Gassensoren (O₂- und CO₂-Sensoren) des MetaMax-Gerätes mit

Hilfe des dazugehörigen Kalibrier-Sets kalibriert und das eingegebene Körpergewicht der Hunde aktualisiert.

Zusätzlich wurde vor jeder einzelnen Messung eine Umgebungsluftmessung durchgeführt, um die in der Software gespeicherten Werte zu aktualisieren.

Für die Messungen auf dem Laufband wurde das Basisgerät in einen kleinen Rucksack speziell für Hunde (Trixie Heimtierbedarf GmbH und Co. KG, Tarp, Deutschland) verpackt und dieser auf dem Rücken der Tiere befestigt. Während der Ruhemessungen lag das Gerät neben den Hunden auf dem Boden.

6.2.2. *Respirometriemaske*

Da das MetaMax-Gerät aus der Humanmedizin stammt, war es notwendig für die Messungen am Tier eine eigens hierfür entwickelte Respirometriemaske anzufertigen. Deren Herstellung orientierte sich an dem im Rahmen einer vorausgegangenen Studie (Ruoss, 2011) bereits erprobten Prototypen. Das Grundgerüst stellte ein plastikummantelter Drahtmaulkorb (Classic, Sofahund, Atzelsdorf, Österreich) dar, der vor allem im Windhunderennsport Verwendung findet. Dieser eignet sich besonders, da er bei guter Passform ein Öffnen des Fanges und damit das Hecheln ermöglicht. Außerdem besitzt dieses Modell einen kleinen Drahtbügel, der über die Stirn der Hunde führt und somit ein sicheres Befestigen des Maulkorbes und eine problemlose Führung der Kabel vom Volumensensor an der Maske zum MetaMax-Gerät gewährleistet.

Das Drahtgestell wurde durch Plastikfolien und Gewebeklebeband (Gaffa-Klebeband) luftdicht verschlossen (Abbildung 4). An der Vorderseite wurde ein so genanntes Reduzierstück oder auch Sifon Nippel (NW 80/40, Handel Vertrieb Dienstleistung, Dortmund, Deutschland) – eine Gummimanschette für Sifonabdichtungen – eingebaut, um ein lückenloses und damit luftdichtes Anstecken des Volumensensors zu ermöglichen. Das Reduzierstück und die Plastikummantelung wurden durch einen handelsüblichen Silikonkleber luftdicht verbunden und die Auflagefläche auf der Schnauze mit Schaumstoff gepolstert. Fixiert wurde die Maske hinter den Ohren der Hunde durch elastische Gummibänder, die ein luftdichtes Verschließen der Maske ermöglichten. Für die Belastungsmessungen wurde zusätzlich ein zweiter, größerer Maulkorb über der Respirometriemaske befestigt, um den Volumensensor vor Stößen und Schlägen zu schützen (Abbildung 5).



Abbildung 4: speziell angefertigte Respirometriemaske in seitlicher Ansicht.

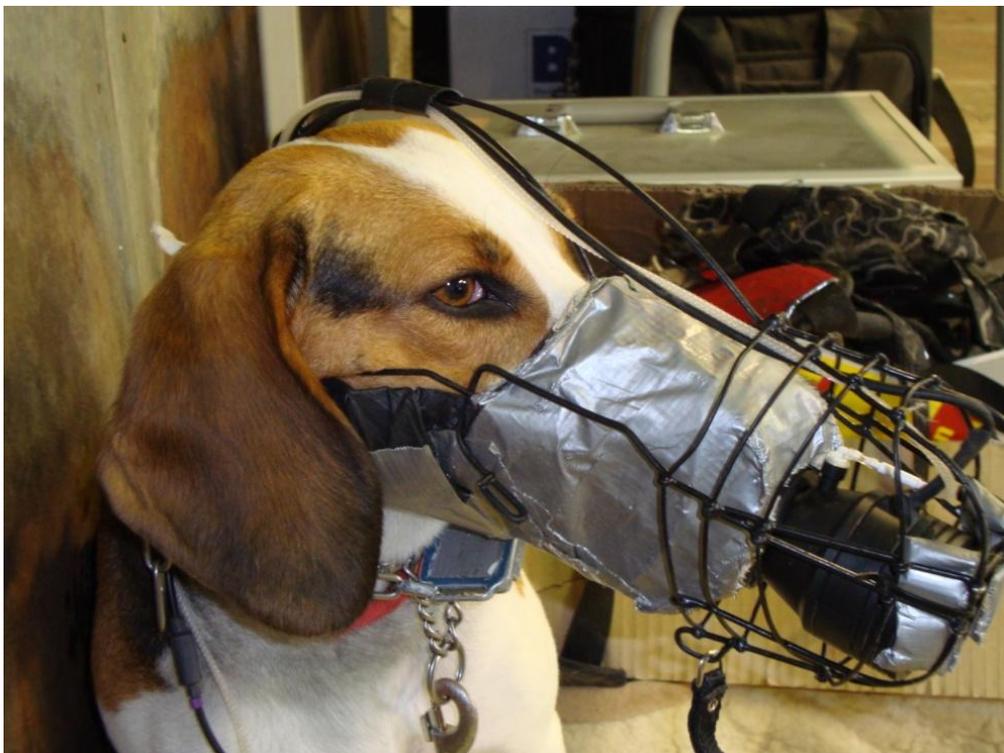


Abbildung 5: speziell angefertigte Respirometriemaske mit Volumensensor und Sensor-Schutz am Hund.

6.2.3. Durchführung der respirometrischen Messungen

Mit dem MetaMax-Respirometrie-Gerät wurden drei Messvarianten durchgeführt: Ruhemessungen, Schwellentests und Maximaltests. Jede der genannten Varianten wurde pro Messphase dreimal durchgeführt. Zu Beginn jeder neuen Messwoche wurde das Gerät neu kalibriert (Umgebungsluftdruck, Volumen- und Gassensoren) und die Gewichte der Tiere ermittelt. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte automatisch im 10-Sekunden-Takt.

Ruhemessungen:

Die Ruhemessungen fanden unter für die Hunde möglichst stressfreien Bedingungen in gewohnter und ruhiger Umgebung statt, um eine minimale Verfälschung der Messergebnisse zu garantieren. Die Dauer der Messungen betrug jeweils 30 Minuten. Während dieser Zeit war es den Hunden freigestellt sich zu setzen oder hinzulegen.

Schwellentests:

Bei den Schwellentests handelt es sich um dreiteilige Messungen, deren Mittelteil auf dem Laufband durchgeführt wurde. Insgesamt betrug die Messdauer 30 Minuten. Die ersten fünf Minuten waren eine kurze Ruhemessung, gefolgt von den Laufbandmessungen - mit je fünf Minuten bei 5km/h, 8km/h und 12km/h. Die Erhöhung der Geschwindigkeit erfolgte standardisiert jeweils innerhalb von 10 Sekunden. Danach wurde auch die 10minütige Erholungsphase erfasst.

Maximaltests:

Auch die Maximaltests bestanden aus drei Teilen: der vorausgehenden fünfminütigen Ruhemessung, einer Belastungsmessung auf dem Laufband und schließlich der Messung der 10minütigen Erholungsphase. Die Hunde liefen auf dem Laufband eine Minute bei 5km/h im lockeren Trab, danach wurde die Geschwindigkeit innerhalb von 10 Sekunden auf 15km/h erhöht. Die Laufdauer war je nach Hund sehr unterschiedlich, da folgende Abbruchkriterien für die Belastung im Maximaltest galten:

- Herzfrequenz $\geq 230/\text{min}$
- Ermüdungserscheinungen (Hunde lassen sich deutlich zurück oder ins Geschirr fallen)
- Erschöpfungszeichen (starkes Hecheln, Speicheln oder ähnliches)

6.2.4. Erhebung der Daten der respirometrischen Messungen

Ruhemessungen:

Für alle bei den Ruhemessungen erfasste Größen wurden Fünf-Minuten-Mittelwerte über den gesamten Messzeitraum gebildet. Von jeder der pro Messphase durchgeführten drei Ruhemessungen wurden die jeweils geringsten Fünf-Minuten-Mittelwerte verwendet und daraus wiederum ein Durchschnittswert errechnet.

Schwellentests:

Bei der Erfassung der in den Schwellentests gewonnenen Daten wurden für jede gelaufene Geschwindigkeit (5km/h, 8km/h und 12km/h) die Drei-Minuten-Mittel gebildet. Für die statistische Auswertung wurden die jeweils letzten Drei-Minuten-Mittelwerte aus den drei durchgeführten Messungen pro Messphase verwendet, um aus diesen Werten nochmals einen Mittelwert zu bilden. Die Entscheidung für die jeweils letzten drei Minuten pro Geschwindigkeit liegt darin begründet, dass sich die Hunde bei jeder Geschwindigkeitserhöhung etwas aufregten, was zunächst zu einer Erhöhung der Messwerte führte. Diese pendelten sich dann ein und waren in den letzten drei Minuten relativ konstant.

Maximaltests:

Im Laufe des Versuches stellte sich heraus, dass einige Hunde mit dem Laufen derart hoher Geschwindigkeiten auf der relativ rauen Oberfläche des Laufbandes Probleme hatten. Nachdem gehäuft Ballenabschürfungen unmittelbar nach der Messung auftraten, wurden die Maximaltests eingestellt. Da somit sämtliche Werte der Messphase „untrainiert II“ fehlen und die Ergebnisse des Maximaltests in einer vorausgehenden Studie der Arbeitsgruppe ohnehin nicht sehr aussagekräftig waren, wurden auch die bis dahin gewonnenen Ergebnisse nicht in die Auswertung mit einbezogen.

Stoffwechselquotient unter spezifischer Belastung

Da es im Rahmen des vorliegenden Versuches nicht möglich war, den wahren Ausdauerstoffwechsel (also den Leistungsstoffwechsel über Tage bzw. Wochen) zu messen, konnte die als Verhältnis von Ausdauerstoffwechsel und Ruhestoffwechsel definierte aerobe Kapazität nicht berechnet werden. Stattdessen wurde der Sauerstoffverbrauch unter einer spezifischen Belastung durch den Sauerstoffverbrauch in Ruhe geteilt, um so den sog. Stoffwechselquotienten unter spezifischer Belastung zu

erhalten. Um diesen Quotienten zu berechnen wurden also die Sauerstoffverbrauchs-Mittelwerte von Schwellentest (12km/h) und Ruhemessung zueinander ins Verhältnis gesetzt. Diese Berechnung erfolgte für jede Messphase einzeln und einmal gemittelt über alle Messphasen.

6.3. Vermessung des Herzens mittels Echokardiographie

6.3.1. Verwendete Geräte

Es wurde ein tragbares Ultraschallgerät mit einem Sektorschallkopf (11mm, 5-8MHz) verwendet (Titan, SonoSite, Bothell, USA). Die mit Hilfe dieses Gerätes gewonnenen Bilder konnten über eine spezielle Software (Site Link Image Manager, Version 2.2.1, SonoSite, Bothell, USA) auf einen Laptop übertragen und dort bearbeitet werden.

6.3.2. Durchführung der Echokardiographie

Der Herzultraschall wurde am stehenden Hund vorgenommen. Dabei wurde der Schallkopf von beiden Seiten parasternal im dritten Intercostalraum angesetzt. Um die Schalleitfähigkeit zu verbessern, fand ein leitendes Gel (Gelbildner PNC 400, OMIKRON GmbH Naturwaren, Neckarwestheim, Deutschland) Anwendung.

Von rechts wurden mit Hilfe des M-Modes die Myocarddicke des linken Ventrikels und des Septums während Systole und Diastole und der endsystolische bzw. der enddiastolische Durchmesser des linken Ventrikels ermittelt. Hierzu wurde zunächst der linke Ventrikel im 2D-Verfahren aufgesucht und die Schnittebene für den M-Mode in der so genannten Myocardebene (parasternal kurze Achse) zwischen den beiden Papillarmuskeln platziert.

Von links erfolgte zunächst eine Messung des Aortendurchmessers im B-Mode während der Systole (parasternal lange Achse), um dann mit dessen Hilfe durch Anwendung des CW-Dopplers (continuous wave) das Schlagvolumen (SV in ml), die Strömungsgeschwindigkeit (V_{max} in cm/s) und das sogenannte Geschwindigkeits-Zeit-Integral (Velocity time integral; VTI in cm) im Pulsed-Wave-Dopplermodus errechnen zu können.

6.3.3. Erhebung der Daten der Echokardiographie

Die Myocarddicke des linken Ventrikels und des Septums und die endsystolischen bzw. enddiastolischen Durchmesser wurden mit Hilfe einer speziellen Software (SigmaScan Pro5, Jandel Scientific, SPSS Inc., Chigago, USA) auf den im M-Mode

gespeicherten Bildern (Abbildung 6 und Abbildung 7) ermittelt, die daraus resultierende Dickenangabe von Pixel wurde in Millimeter umgerechnet (entsprechend der jeweiligen Eindringtiefe) und aus jeweils drei Werten pro Messphase ein Mittelwert errechnet.

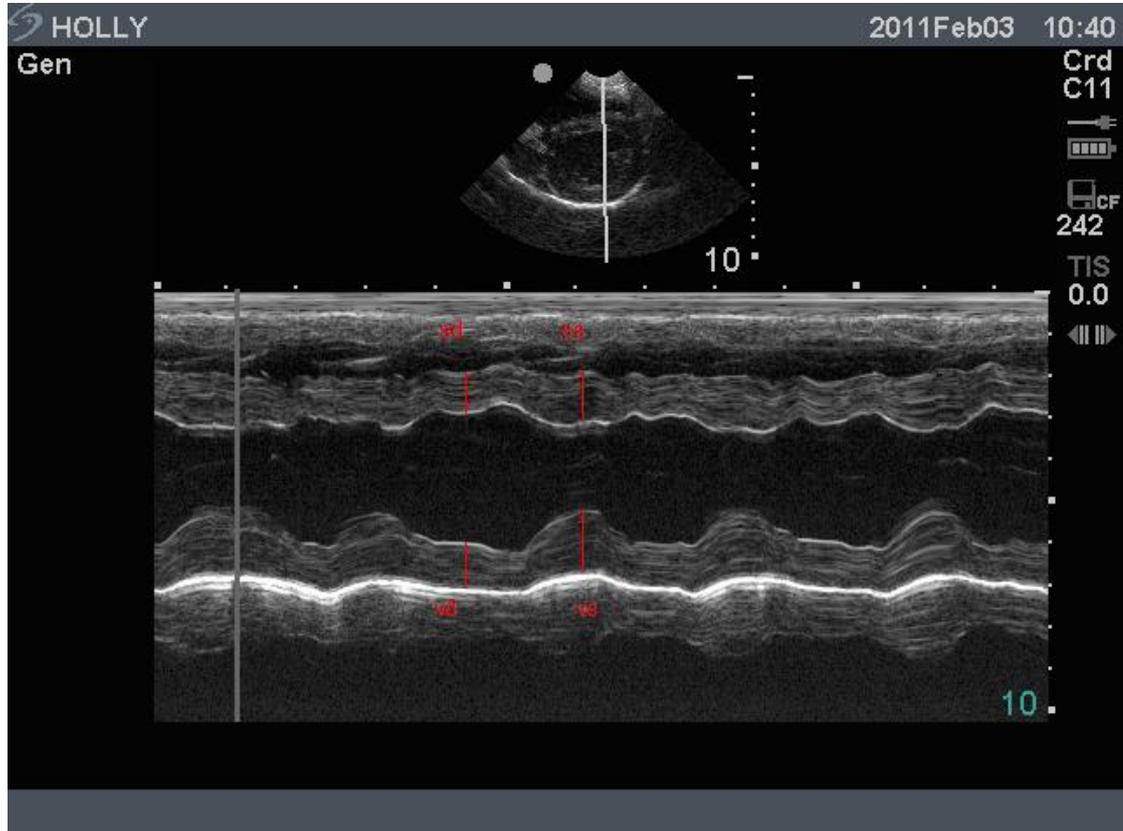


Abbildung 6: Vermessung der Myokarddicken: Septum während Diastole (sd), Septum während Systole (ss), Wand des linken Ventrikels während Diastole (vd) und Wand des linken Ventrikels während Systole (vs).

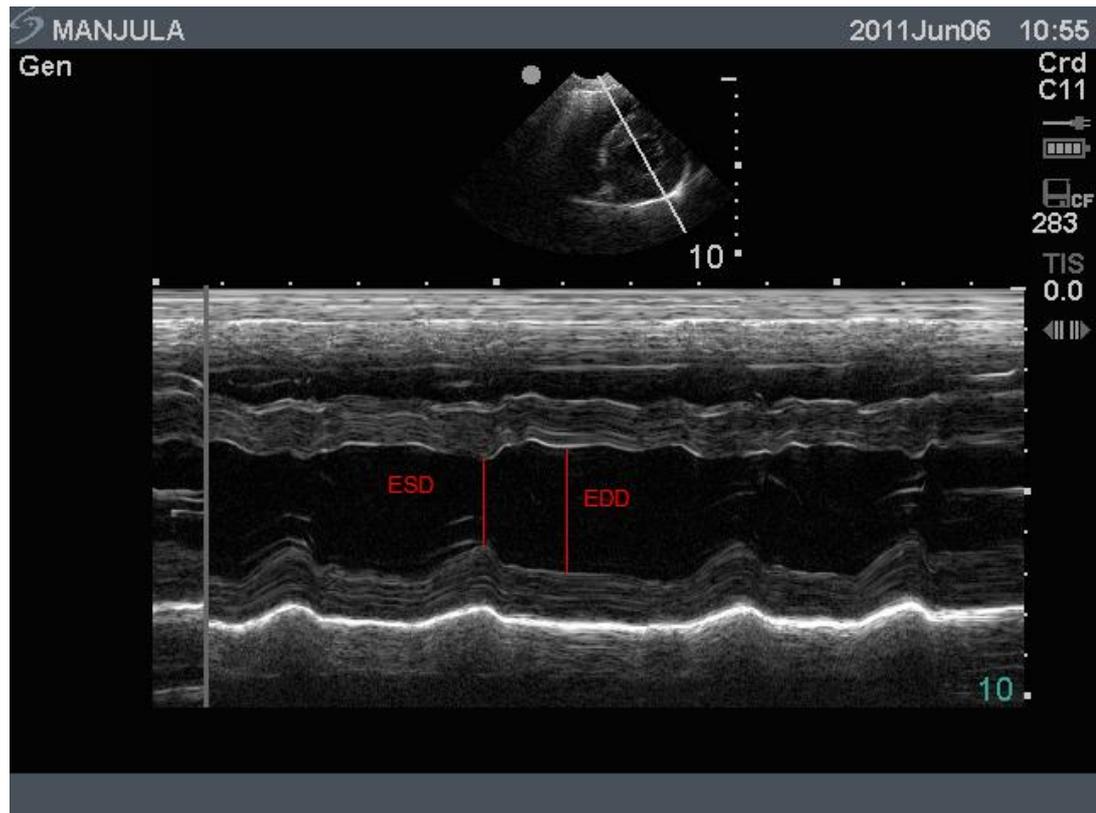


Abbildung 7: Vermessung der Ventrikeldurchmesser: endsystolischer Durchmesser (ESD) und enddiastolischer Durchmesser (EDD).

Zusätzlich wurde der Aortendurchmesser an der breitesten Stelle (unmittelbar hinter der Klappenebene, bei geöffneter Klappe) der im Längsschnitt dargestellten Aorta ermittelt (Abbildung 8).

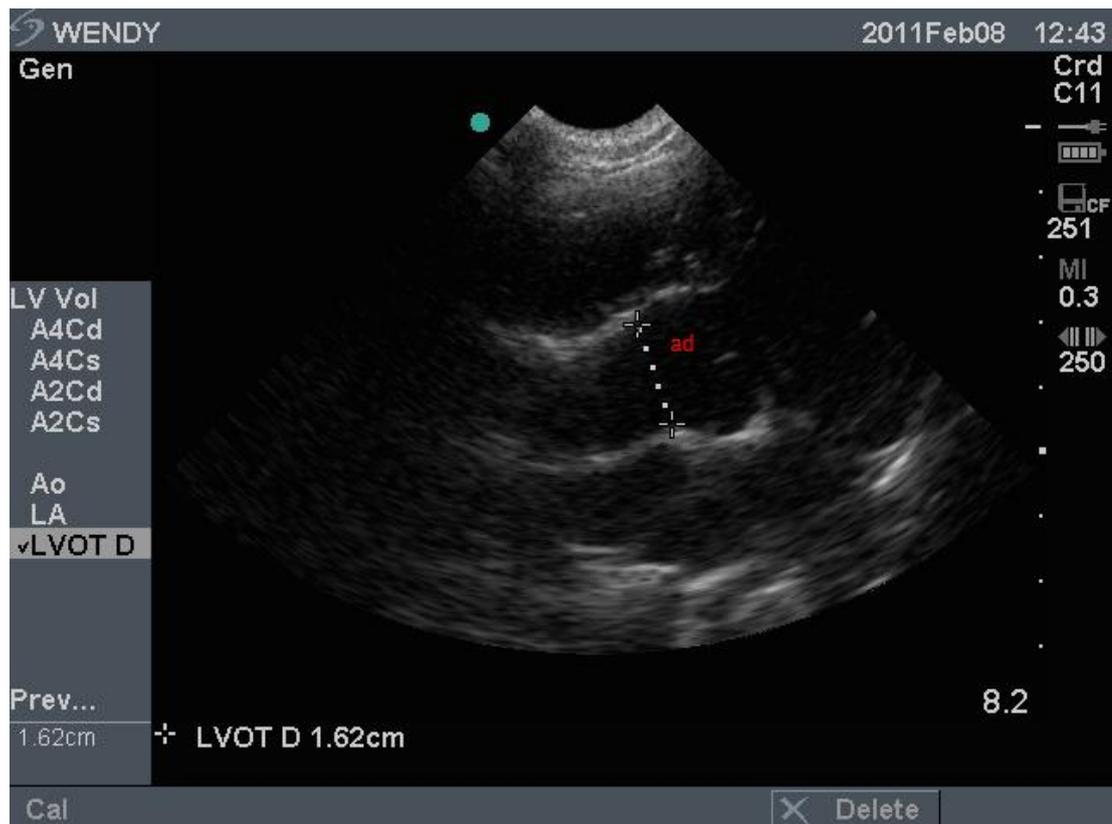


Abbildung 8: Vermessung des Aortendurchmessers (ad) während der Systole.

Das Schlagvolumen wurde direkt am Ultraschallgerät mit Hilfe des Trackballs durch eine Konturmarkierung der Fluss-Zeit-Kurve ermittelt (Abbildung 9). Die Berechnung der oben genannten Werte (V_{max} und Geschwindigkeits-Zeit-Integral) fand gerätegestützt automatisch statt und musste für die statistische Auswertung lediglich übertragen werden.

Außerdem wurde als Herzfunktionsparameter die Verkürzungsfraction (shortening fraction, FS) mithilfe folgender Formel berechnet:

$$FS[\%] = (d_{Diastole} - d_{Systole}) \div d_{Diastole} \times 100$$

Wobei:

d : Durchmesser des linken Ventrikels in Diastole bzw. Systole [mm]

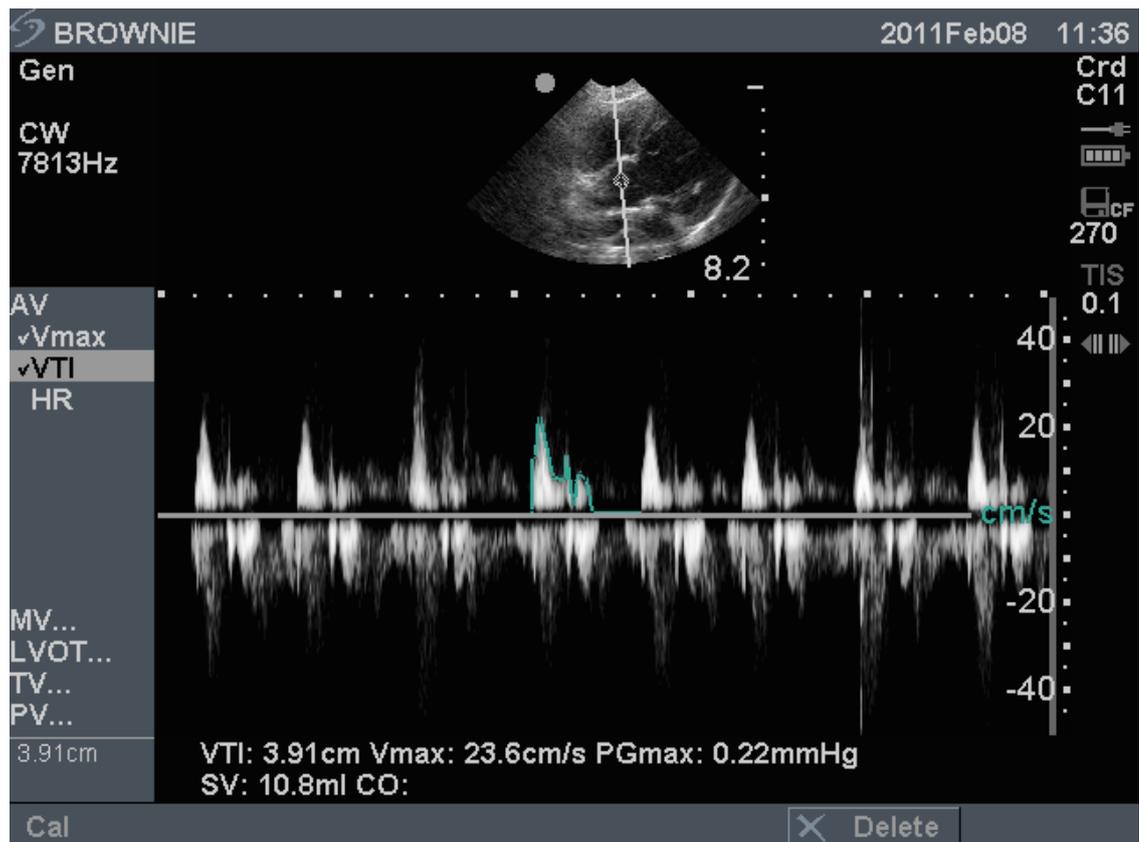


Abbildung 9: Ermittlung des Schlagvolumens durch Konturmarkierung mit Hilfe des Trackballs.

6.4. Elektrokardiographie

6.4.1. Verwendete Geräte

Für die Anfertigung der Ruhe- bzw. Belastungs-EKGs wurde ein drahtloses und transportables PC-EKG-System mit Bluetooth-Echtzeitdatenübertragung (Televet 100, Kruuse, Marslev, Dänemark) verwendet.

Als EKG-Elektroden fanden Silberchlorid-Gelelektroden (F-55, 55mm, Megro, Wesel, Deutschland) Anwendung.

6.4.2. Durchführung des Elektrokardiogramms

In jeder Messphase wurde sowohl ein Ruhe-EKG (Dauer: 5min) als auch ein Belastungs-EKG (Dauer: 30min) angefertigt. Die Aufzeichnung des Belastungs-EKGs fand analog zur Durchführung eines Schwellentests statt. 5min Ruhe, 5min 5km/h, 5min 8km/h, 5min 12km/h und anschließend 10min Erholung. Das Ruhe-EKG wurde am auf der rechten Körperseite liegenden Tier aufgezeichnet.

Die Elektroden wurden für Ruhe- und Belastungsmessungen identisch am Hund angebracht:

Um Haftung und Leitung der Elektroden zu gewährleisten, wurden die betroffenen Körperstellen auf ca. 5x5cm großen Flächen geschoren und mit Alkohol entfettet. Zwei Elektroden wurden beidseits zwei-fingerbreit kaudal des Schultergelenkes und drei-fingerbreit ventral der Wirbelsäule und zwei weitere beidseits zwei-fingerbreit kaudal des Ellbogengelenks und drei-fingerbreit dorsal des Sternums aufgeklebt. Die EKG-Kabel wurden folgendermaßen positioniert: Rechts wurde das rote dorsal, das gelbe ventral angebracht. Auf der linken Körperseite wurde das schwarze dorsal und das grüne Kabel ventral befestigt (Abbildung 10 und Abbildung 11).

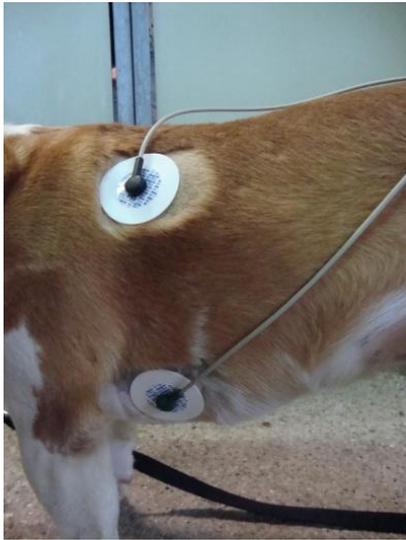


Abbildung 10: Positionierung der EKG-Elektroden am Tier (Ansicht von links).



Abbildung 11: Positionierung der EKG-Elektroden am Tier (Ansicht von rechts).

Für das Belastungs-EKG wurden die Elektroden samt EKG-Kabel zusätzlich mit um den Brustkorb gespannten elastischen Binden gesichert, um ein Verrutschen während

der Bewegung zu vermeiden. Das Televet 100-Gerät wurde, durch eine Stoffhülle geschützt, ebenfalls mit elastischen Binden auf dem Rücken der Hunde befestigt (Abbildung 12 und Abbildung 13).



Abbildung 12: Befestigung der EKG-Elektroden für das Belastungs-EKG.



Abbildung 13: Befestigung des transportablen Televet100 für das Belastungs-EKG.

Für die Aufzeichnung und Auswertung der Daten wurde eine spezielle Software verwendet (ECG Software, Version 4.1.3b, Rösch & Associates Information Engineering GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland).

Die Aufzeichnung der EKGs erfolgte im Einthoven-Modus (zur Auswertung verwendet wurde die Ableitung Einthoven II) mit einem Papiervorschub von 50mm/s und einer Empfindlichkeit von 10mm/mV.

6.4.3. Erhebung der Daten des Elektrokardiogramms

Die Auswertung der EKGs erfolgte computergestützt, aufgrund der physiologischen atmungsabhängigen Sinusarrhythmie der Hunde allerdings unter visueller Kontrolle. Verwendet wurde das bereits erwähnte Software-Programm (ECG Software, Version 4.1.3b, Rösch & Associates Information Engineering GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland).

Um die visuelle Auswertung der EKGs zu erleichtern, wurden den aufgezeichneten EKG-Kurven quadratische Kästchen hinterlegt. Bei den oben erwähnten Einstellungen (50mm/s und 10mm/mV) entsprach so die Höhe eines Kästchens 0,1mV und seine Breite 0,2 Sekunden.

Da die Tiere in dieser Studie kardiologisch vollkommen unauffällig waren, wurde der Schwerpunkt der EKG-Daten-Erhebung auf die Ermittlung der unterschiedlichen Herzfrequenzen in Ruhe und unter Belastung gelegt. Für die Ermittlung der Herzfrequenz wurden die Herzschläge (also R-R-Intervalle) zwischen drei Zeitstrichen des EKG-Papiers (\triangleq 15cm bzw. drei Sekunden Aufzeichnungszeit) ausgezählt. Die so erhaltene Zahl konnte dann mit 20 multipliziert werden, um auf die Anzahl der Schläge pro Minute zu kommen. Eine alternative Möglichkeit zur Auswertung der Herzfrequenzen stellt ein EKG-Lineal dar, was aber nach dem gleichen Prinzip funktioniert.

Aus den so gewonnenen Herzfrequenzen wurden dann für jeden Hund und jede durchgeführte Messung (Ruhe-EKG, Belastungs-EKG bei 5km/h, 8km/h und 12km/h) die maximale, die minimale und die mittlere Herzfrequenz ermittelt.

6.5. Muskeldickemessungen mittels Ultraschall

6.5.1. Verwendete Geräte

Für die Ultraschalluntersuchung der Muskulatur wurde dasselbe Gerät genutzt, wie schon beim Herzultraschall (Titan, SonoSite, Bothell, USA). Allerdings wurde nicht der Sektor-, sondern der Linearschallkopf (7,5-10 MHz) verwendet.

6.5.2. Durchführung des Muskelultraschalls

Der Muskelultraschall fand pro Messphase dreimal statt. Je durchgeführte Messung wurden drei Bilder zur Mittelwertberechnung herangezogen, so dass sich der Mittelwert aus insgesamt neun Bildern zusammensetzte.

Folgende Lokomotionsmuskeln wurden geschallt:

Tabelle 4: geschallte Lokomotionsmuskulatur.

| | Ursprung | Ansatz | Funktion |
|--|---|--|--|
| M. supraspinatus und M. trapezius (pars cervicalis) | Fossa supraspinata 3. Halswirbel bis 9. Brustwirbel | Tuberculum majus/minus humeri Scapula (proximal) | Strecker des Schultergelenks Beweger von Rumpf, Hals, Kopf und Extremitäten |
| M. infraspinatus und M. deltoideus (pars scapularis) | Fossa infraspinata Spina scapulae | Facies m. infraspinati Tuberositas deltoidea | Hilfsbeuger des Schultergelenks Beuger des Schultergelenks, Abduktion und Rotation der Vordergliedmaße |
| M. biceps femoris und M. vastus lateralis (lateraler Anteil d. M. quadriceps femoris) | Sacrum, Pelvis Laterale Femurfläche | Patella, Fascia cruris Patella, Tuberositas tibiae | Beuger des Kniegelenks, Strecker des Tarsus Strecker des Kniegelenkes |
| M. longissimus dorsi | Procc. spinosi | Fortsätze der Brustwirbelsäule | Feststellen und Strecken der Wirbelsäule, Aufrichten des Vorderkörpers |

Um die Messstelle über die verschiedenen Messtage und –phasen möglichst konstant zu halten, wurden die Spina scapulae und der Femur in ihrer Länge vermessen. Der Schallkopf wurde dann auf halber Länge des jeweiligen Knochens lateral und im 90° Winkel zum Knochen auf die Gliedmaße aufgesetzt. Die Ultraschalluntersuchung der Lendenmuskulatur wurde immer zwischen den beiden letzten Lendenwirbeln vorgenommen. Die Messungen fanden im Stehen und auf der linken Körperseite der Hunde statt.

6.5.3. Erhebung der Daten des Muskelultraschalls

Die Ultraschallbilder der Muskulatur wurden mit Hilfe einer speziellen Software (SigmaScan Pro5, Jandel Scientific, SPSS Inc., Chigago, USA) vermessen. Die daraus resultierende Dickenangabe in Pixel wurde entsprechend der jeweiligen Eindringtiefe in Millimeter umgerechnet. Aus den Werten jedes einzelnen Messtages wurde jeweils ein Mittelwert ermittelt. Aus den so erhaltenen drei Werten (einer je Messtag) wurde wiederum ein Mittelwert errechnet, so dass man pro Messphase einen Wert (über insgesamt neun Messwerte gemittelt) erhielt.

M. supraspinatus und M. trapezius:

Begonnen wurde mit der Dickenmessung an der tiefsten (medialsten) Stelle der beiden Muskeln. Diese ist dank der erkennbaren Begrenzung durch die Fläche der Fossa supraspinata leicht aufzufinden. Die Messlinie führte parallel zur Spina scapulae und endete an der dorsalen Begrenzung durch die Muskelfaszie, ein Anteil der Fascia profunda (Abbildung 14).

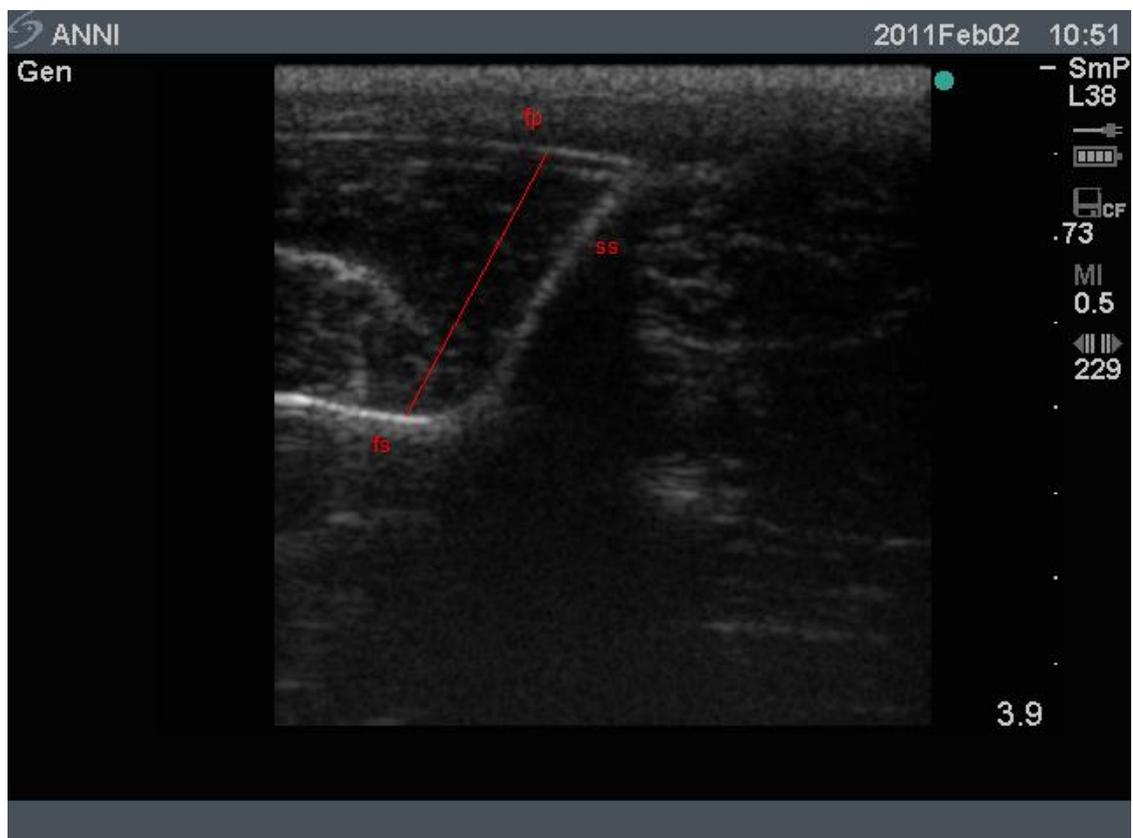


Abbildung 14: Vermessung des M. supraspinatus und des flach aufliegenden M. trapezius: spina scapulae (ss), fascia profunda (fp) und fossa supraspinata (fs).

M. infraspinatus und M. deltoideus:

Der M. infraspinatus und der M. deltoideus wurden auf ähnliche Weise vermessen: Zuerst wurde der tiefste (medialste) Punkt der Muskeln aufgesucht (erkennbar durch die Fläche der Fossa infraspinata) und im Folgenden eine senkrechte Linie bis zur oberen Faszienbegrenzung gezogen (Abbildung 15).

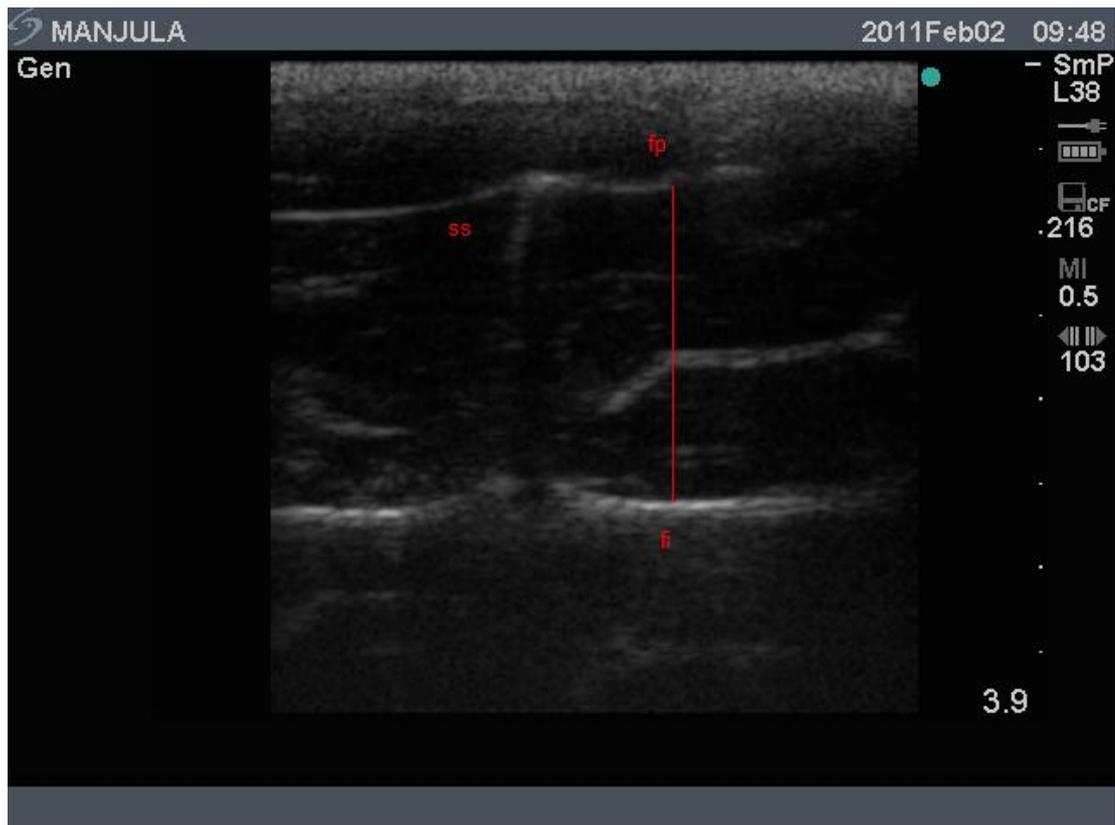


Abbildung 15: Vermessung des M. infraspinatus und des M. deltoideus: spina scapulae (ss), fascia profunda (fp) und fossa infraspinata (fi).

M. biceps femoris und M. vastus lateralis:

Am M. biceps femoris und am M. vastus lateralis wurde die Messlinie vom Femurkopf (Caput ossis femoris) senkrecht nach oben bis zum Abschluss des Muskels durch die Fascia lata geführt (Abbildung 16).

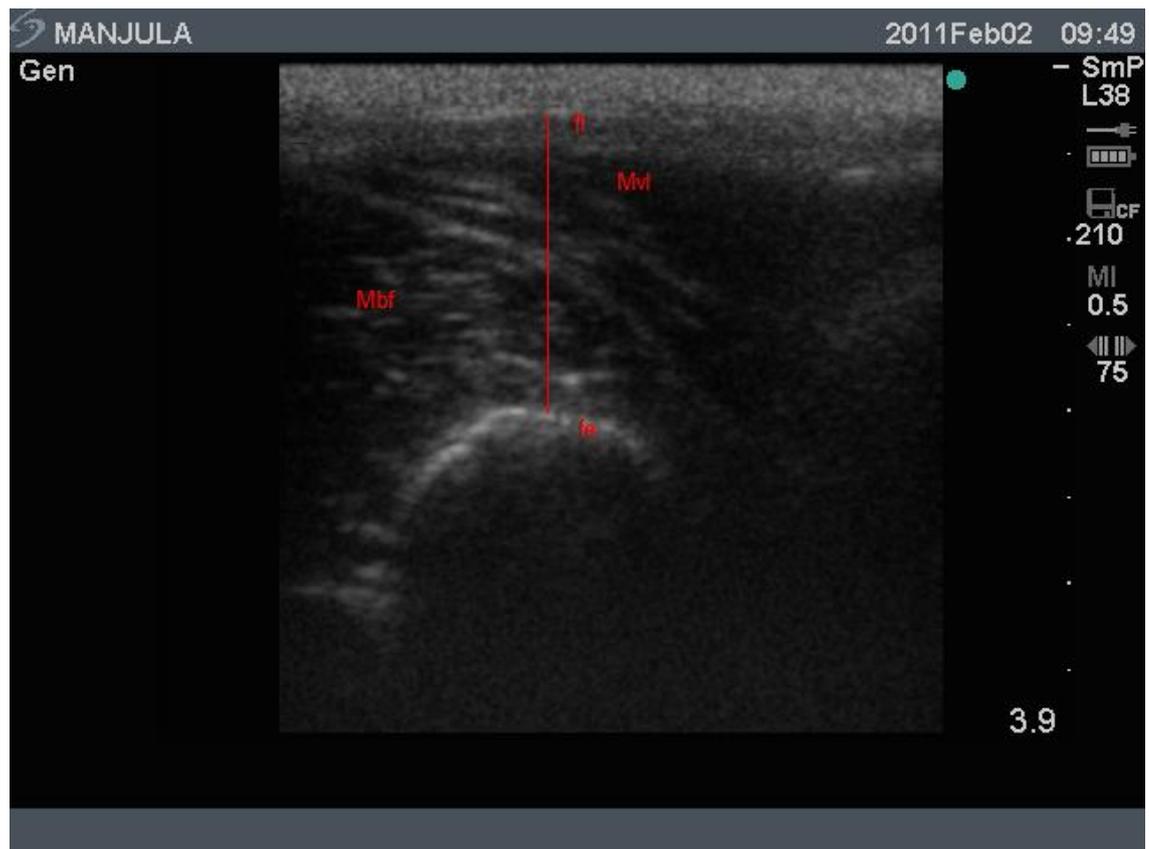


Abbildung 16: Vermessung des M. biceps femoris und des M. vastus lateralis: Femur (fe), M. biceps femoris (Mbf), M. vastus lateralis (Mvl) und fascia lata (fl).

M. longissimus dorsi:

Die Dicke dieses Muskels wurde zwischen der dorsalen Fläche des Arcus vertebrae und dem dorsalen Ende des Proc. spinosus bzw. der dorsalen Begrenzung durch das Lig. nuchae gemessen (Abbildung 17).



Abbildung 17: Vermessung des M. longissimus dorsi: processus spinosus (ps) und arcus vertebrae (av).

6.6. Temperaturmessungen

6.6.1. Verwendete Geräte

Um die Umgebungstemperaturen während des gesamten Versuchszeitraumes kontinuierlich erfassen zu können, wurden digitale Temperatursensoren (i-Button DS2422, Maxim Integrated Products, Sunnyvale, Kalifornien) verwendet. Der Messbereich dieser Sensoren liegt zwischen -40°C und $+85^{\circ}\text{C}$. Das Auflösungsvermögen beträgt $0,0625^{\circ}\text{C}$ und die Größe des Speichers 8192 Bytes. Das Gerät erfasst sowohl die Umgebungstemperatur als auch Zeit und Datum und speichert diese Daten.

Diese gespeicherten Temperaturen können mit Hilfe eines Adapters mit USB-Anschluss (DS9490R, Maxim Integrated Products, Sunnyvale, Kalifornien) und einer speziellen Software (OneWireViewer, Maxim Integrated Products, Sunnyvale, Kalifornien) auf einen PC oder Laptop übertragen werden.

6.6.2. Durchführung der Temperaturmessungen

Die i-Buttons wurden an den unterschiedlichen Aufenthaltsorten der Hunde angebracht:

- Im Hundestall
- Am Außenzwinger
- Am Laufband

Das Aufzeichnungsintervall wurde auf einmal pro Stunde festgelegt. Die Daten wurden ca. einmal monatlich ausgelesen.

6.6.3. Erhebung der Daten der Temperaturmessungen

Für die jeweiligen Phasen wurden aus den Stundenwerten Tagesmittel errechnet und eine Temperaturverlaufskurve erstellt. Außerdem wurden sogenannte Temperaturcluster gebildet, um den Einfluss der Umgebungstemperatur auf die freie Aktivität der Hunde untersuchen zu können. Hierfür wurde die 24-Stunden-Durchschnittstemperatur eines jeden Tages einem Temperaturcluster zugeordnet (je nach Tagesdurchschnittstemperatur: Cluster A: -10°C bis $+5^{\circ}\text{C}$, Cluster B: $+5^{\circ}\text{C}$ bis $+20^{\circ}\text{C}$, Cluster C: $+20^{\circ}\text{C}$ bis $+30^{\circ}\text{C}$). Die Aktivitäten innerhalb der jeweiligen Cluster wurden dann statistisch miteinander verglichen.

6.7. Aktivitätsmessungen

6.7.1. Verwendete Geräte

Um die Aktivität der Hunde dauerhaft erfassen zu können, wurden omnidirektionale Beschleunigungssensoren (Actical, Philips Healthcare, Hamburg, Deutschland) verwendet.

Dabei handelt es sich um piezoelektrische Kristalle, von denen durch Bewegung entstehende Spannungen erfasst werden. Mit Hilfe der Technik der digitalen Integration ist gewährleistet, dass nicht nur die Dauer, sondern auch die Intensität der Bewegung der Tiere erfasst wird. Das Gerät misst 32mal pro Sekunde die erfolgten Beschleunigungen und integriert dann über eine individuell festlegbare Epochenlänge (in dieser Studie betrug die Epochenlänge eine Minute). Die Angabe der erfassten Daten erfolgt in so genannten Activity Counts.

Um die aufgezeichneten Aktivitätsdaten auslesen und auf einen Computer importieren zu können, wurde der so genannte ActiReader (Philips Healthcare, Hamburg, Deutschland), der über einen RS-232-Port mit jedem PC oder Notebook verbunden werden kann, und die zugehörige Software (Actical Software, Version 2.12, Philips Healthcare, Hamburg, Deutschland) verwendet.

6.7.2. Durchführung der Aktivitätsmessungen

Die Hunde trugen die Acticals während des gesamten Versuchszeitraumes in schützenden, an einem Gliederhalsband befestigten, ca. 5x3x1cm großen Metallkästchen (Mini Mitter, Bend, Oregon) um den Hals. Das Auslesen der Daten mit Hilfe des ActiReaders erfolgte einmal pro Monat.

6.7.3. Erhebung der Daten der Aktivitätsmessungen

Verwendet wurden hierfür die so genannten Activity Counts („Aktivitätszählpunkte“) pro Stunde, errechnet aus den jeweiligen Ein-Minuten-Werten. Zur Auswertung wurden außerdem lediglich die Daten der Zeiten herangezogen, zu denen die Hunde sich relativ frei bewegen konnten, also die Daten, die während des Auslaufes in den Außenzwingern aufgezeichnet wurden (zwar waren die Hunde in der Regel unter der Woche zwischen 8:00 Uhr und 15:00 Uhr in den Außenzwingern, doch wurde für die Auswertung die Zeitspanne von 9:00 Uhr bis ca. 14:00 Uhr verwendet, damit eventuell längere Ruhezeiten in den Innenzwingern die Messungen nicht verfälschten). Die Zeiten, die die Hunde auf dem Laufband oder bei anderen Messungen verbrachten, wurden herausgefiltert.

Die Tagesaktivität eines jeden Hundes wurde dann über den jeweiligen Zeitraum (Messphasen, Trainingsphase, trainingsfreie Zeit) gemittelt. Des Weiteren wurden für den gesamten Versuchszeitraum „Wochentagsmittel“ errechnet, d.h. die Tagesmittelwerte sämtlicher Montage, Dienstage usw. wurden jeweils noch einmal gemittelt, um einen Einfluss der Wochentage auf die freie Aktivität der Hunde untersuchen zu können. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Umgebungstemperaturen auf die Aktivität ermitteln zu können, wurden die Tagesaktivitäten der Hunde außerdem nach Außentemperatur geclustert (Cluster A: -10°C bis +5°C, Cluster B: +5°C bis +20°C, Cluster C: +20°C bis +30°C) und die „Clustermittelwerte“ errechnet. Diese wurden dann statistisch miteinander verglichen.

7. Statistische Methoden

Für die statistische Auswertung wurde SigmaStat3.5 und SigmaPlot 10.0 (Systat Software Inc., San Jose, Kalifornien) verwendet. Für alle Messwerte wurden für die jeweilige Messphase Mittelwerte und die Standardabweichung errechnet und diese untereinander verglichen. Falls Messfehler oder Datenausreißer auftraten, wurden diese bei der Auswertung manuell entfernt. Soweit die Werte normalverteilt und die

Varianzen gleich waren, wurde eine unifaktorielle Varianzanalyse mit Messwertwiederholung (rm ANOVA - ANOVA: Analysis of Variance) erstellt. Falls dies nicht der Fall war, erfolgte eine Varianzanalyse mit Rangsummen (rm ANOVA on Ranks).

Das Signifikanzniveau lag bei 0,05 ($p \leq 0,05$) und wird im Folgenden bei Grafiken mit * gekennzeichnet.

V. Ergebnisse

1. Herzfrequenzen

1.1. Herzfrequenzen in Ruhe

Die Fünf-Minuten-Minima, die sich aus den während der Ruhemessungen gewonnenen Herzfrequenzen ergaben, zeigten einen statistisch signifikanten Abfall von den trainierten Hunden zu den Hunden nach der trainingsfreien Zeit ($F_{1, 19} = 14,089$, $p = 0,005$, rm ANOVA). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“ (Abbildung 18).

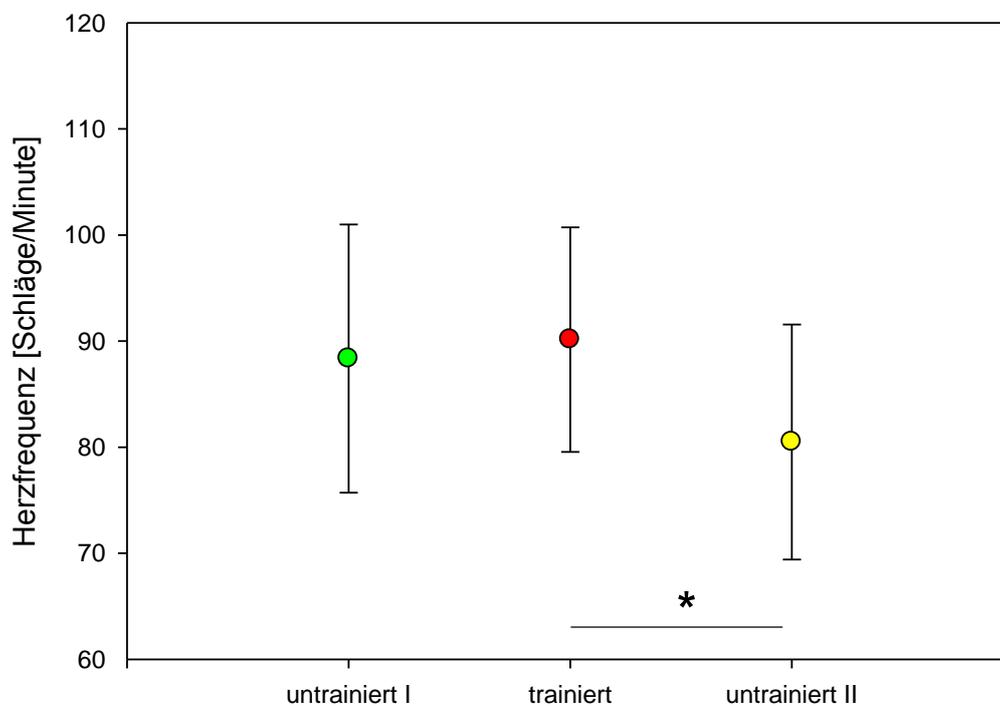


Abbildung 18: Fünf-Minuten-Minima der Ruheherzfrequenzen von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

1.2. Herzfrequenzen unter Belastung

Die während des Schwellentests aufgezeichneten Herzfrequenzen bzw. die daraus ermittelten Drei-Minuten-Mittelwerte ergaben während keiner der gelaufenen Geschwindigkeiten statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Hunden im Zustand „untrainiert I“, „trainiert“ und „untrainiert II“ (Abbildung 19).

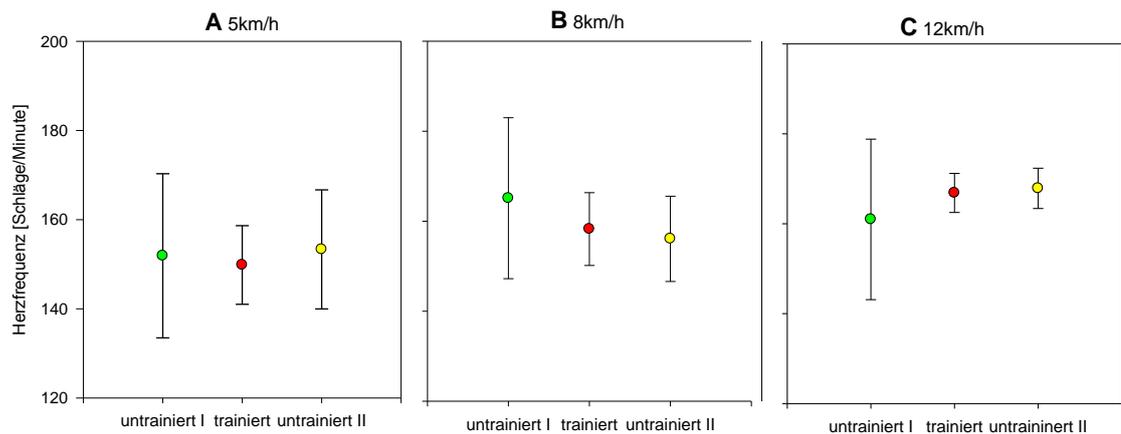


Abbildung 19: Drei-Minuten-Mittelwerte der Herzfrequenzen unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●). jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

2. Respirometrie

2.1. Sauerstoffaufnahme

Die Sauerstoffaufnahme wurde sowohl in absoluten Werten [l/min], wie auch in Relation zum Körpergewicht der Hunde [ml/min/kg KM] ermittelt.

2.1.1. Sauerstoffaufnahme in Ruhe

Die absolute und die relative Sauerstoffaufnahme zeigten zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“ und zwischen „trainiert“ und „untrainiert II“ statistisch signifikante Unterschiede. So kam es nach dem Training zu einem Anstieg ($F_{1,19} = 14,710$, $p = 0,004$, rm ANOVA) und nach der trainingsfreien Zeit zu einem Abfall ($F_{1,19} = 20,697$, $p = 0,001$, rm ANOVA) der absoluten Sauerstoffaufnahme.

Auch die relative Sauerstoffaufnahme stieg durch das Training an ($p = 0,002$, rm ANOVA on Ranks) und sank durch die anschließende trainingsfreie Zeit wieder ab ($F_{1,19} = 23,471$, $p < 0,001$, rm ANOVA). Keine Unterschiede ergaben sich jeweils zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ (Abbildung 20).

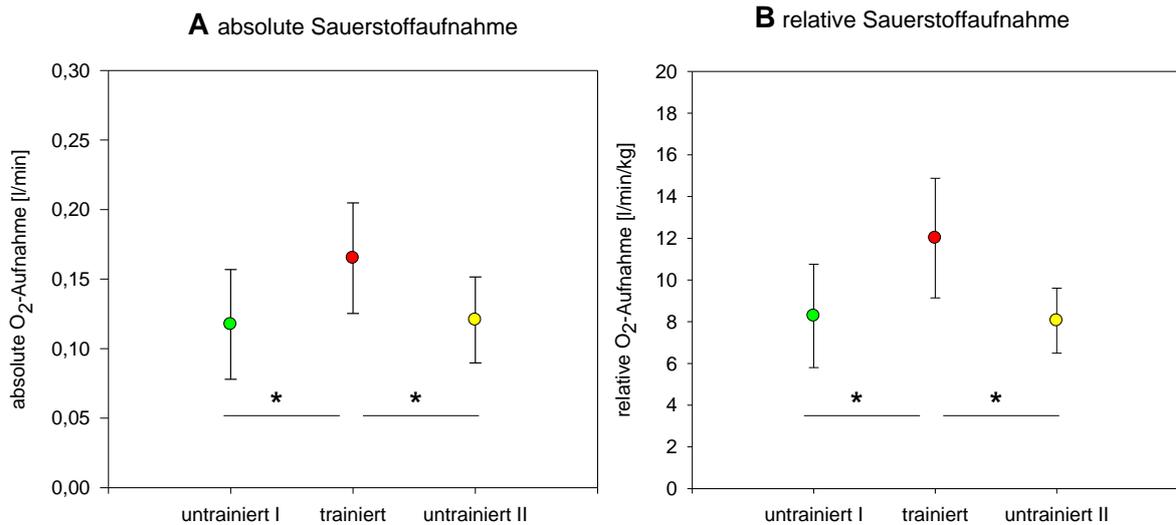


Abbildung 20: Drei-Minuten-Mittelwerte des absoluten (A) und des relativen (B) Sauerstoffverbrauchs in Ruhe von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

2.1.2. Sauerstoffaufnahme unter Belastung

Die Sauerstoffaufnahme in Litern pro Minute zeigte bei allen drei Geschwindigkeiten, also bei 5km/h ($F_{1,15} = 26,974$, $p = 0,001$, rm ANOVA), 8km/h ($F_{1,15} = 21,002$, $p = 0,003$, rm ANOVA) und 12km/h ($F_{1,15} = 42,185$, $p \leq 0,001$, rm ANOVA) einen statistisch signifikanten Abfall vom Zustand „trainiert“ zum Zustand „untrainiert II“ (Abbildung 21).

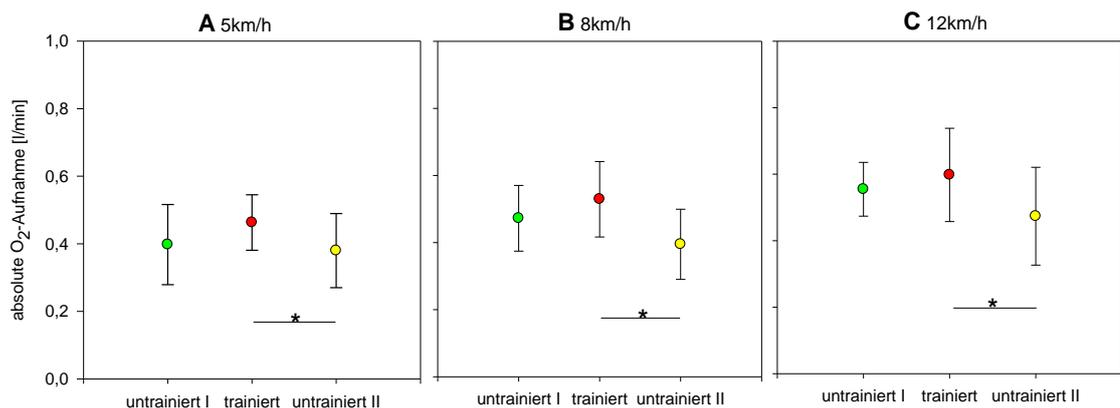


Abbildung 21: Drei-Minuten-Mittelwerte des absoluten Sauerstoffverbrauchs unter Belastung von acht Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●), jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

Etwas anders verhielt es sich bei der relativen Sauerstoffaufnahme. Bei einer Laufgeschwindigkeit von 5km/h kam es zu einem statistisch signifikanten Abfall im Vergleich von trainierten Hunden und Hunden nach der Trainingspause ($F_{1,15} = 74,147$, $p < 0,001$, rm ANOVA). Training bewirkte außerdem bei einer Geschwindigkeit von 8km/h einen signifikanten Anstieg des Sauerstoffverbrauches gegenüber Hunden in den Zuständen „untrainiert I“ ($F_{1,15} = 12,554$, $p = 0,009$, rm ANOVA) und „untrainiert II“ ($F_{1,15} = 33,625$, $p < 0,001$, rm ANOVA). Zusätzlich konnte ein statistisch signifikanter Abfall der relativen Sauerstoffaufnahme zwischen den Hunden in den Messphasen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ beobachtet werden ($F_{1,15} = 6,263$, $p = 0,041$, rm ANOVA). Auch bei 12km/h konnte ein signifikanter Abfall des Sauerstoffverbrauches in der untrainiert II-Messphase gegenüber der untrainiert I-Messphase ermittelt werden ($F_{1,15} = 12,111$, $p = 0,010$, rm ANOVA). Außerdem kam es auch hier zu einem statistisch signifikanten Abfall der relativen Sauerstoffaufnahme im Vergleich zwischen Hunden in den Zuständen „trainiert“ und „untrainiert II“, allerdings nicht zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“, ($F_{1,15} = 42,467$, $p < 0,001$, rm ANOVA) (Abbildung 22).

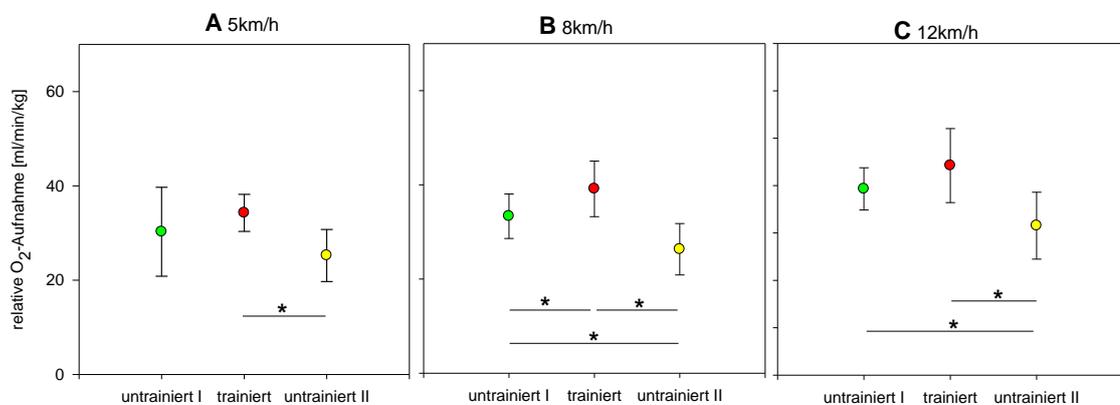


Abbildung 22: Drei-Minuten-Mittelwerte des relativen Sauerstoffverbrauchs unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

2.1.3. Stoffwechselquotient unter spezifischer Belastung

Bei dem Stoffwechselquotienten handelt es sich um das Verhältnis von Ruhe- (resting metabolic rate, RMR) und Leistungsstoffwechsel (metabolic rate, MR) während einer definierten Belastung. Sie drückt also die Fähigkeit der Tiere aus, unter einer bestimmten Belastung ihren Ruhestoffwechsel auf ein Vielfaches zu steigern. Um

diesen Quotienten zu berechnen wurden die Sauerstoffverbrauchs-Mittelwerte von Schwellentest (12km/h) und Ruhemessung zueinander ins Verhältnis gesetzt.

Diese Berechnung erfolgte für jede Messphase einzeln und einmal gemittelt über alle Messphasen (Tabelle 5). Daraus ergab sich eine mittlere Erhöhung des Leistungsstoffwechsels bei einer spezifischen Belastung auf das 4,18fache des Ruhestoffwechsels.

Tabelle 5: Sauerstoffverbrauch [l/min] während Ruhemessung (RMR) bzw. Schwellentest (MR, 12km/h) und der Stoffwechselquotient (Verhältnis Ruhe-/Leistungsstoffwechsel); Werte jeweils über alle drei Messphasen gemittelt; MW: Mittelwert, s: Standardabweichung.

| Hund | RMR | MR (12km/h) | MR/RMR |
|-------------|-------------|--------------------|---------------|
| | [l/min] | [l/min] | |
| Anni | 0,12 | 0,44 | 3,62 |
| Holly | 0,12 | 0,43 | 3,66 |
| Magda | 0,21 | 0,80 | 3,73 |
| Manjula | 0,09 | 0,56 | 6,04 |
| Möhre | 0,12 | 0,51 | 4,26 |
| Schoko | 0,15 | 0,51 | 3,42 |
| Umbra | 0,12 | 0,59 | 5,07 |
| Wendy | 0,14 | 0,50 | 3,64 |
| MW | 0,13 | 0,54 | 4,18 |
| s | 0,04 | 0,12 | 0,92 |

Vergleicht man die Werte des Quotienten der einzelnen Messphasen untereinander, so ergeben sich statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Hunden im Zustand „untrainiert I“ und „trainiert“ ($F_{1,15} = 12,540$, $p = 0,009$, rm ANOVA) sowie zwischen den Hunden im Zustand „untrainiert I“ und „untrainiert II“ ($F_{1,15} = 8,630$, $p = 0,022$, rm ANOVA). Der Stoffwechselquotient war nach dem Training geringer als im „untrainierten I“ - Zustand. Zusätzlich war der Stoffwechselquotient im Zustand „untrainiert I“ signifikant größer als im Zustand „untrainiert II“ (Abbildung 23).

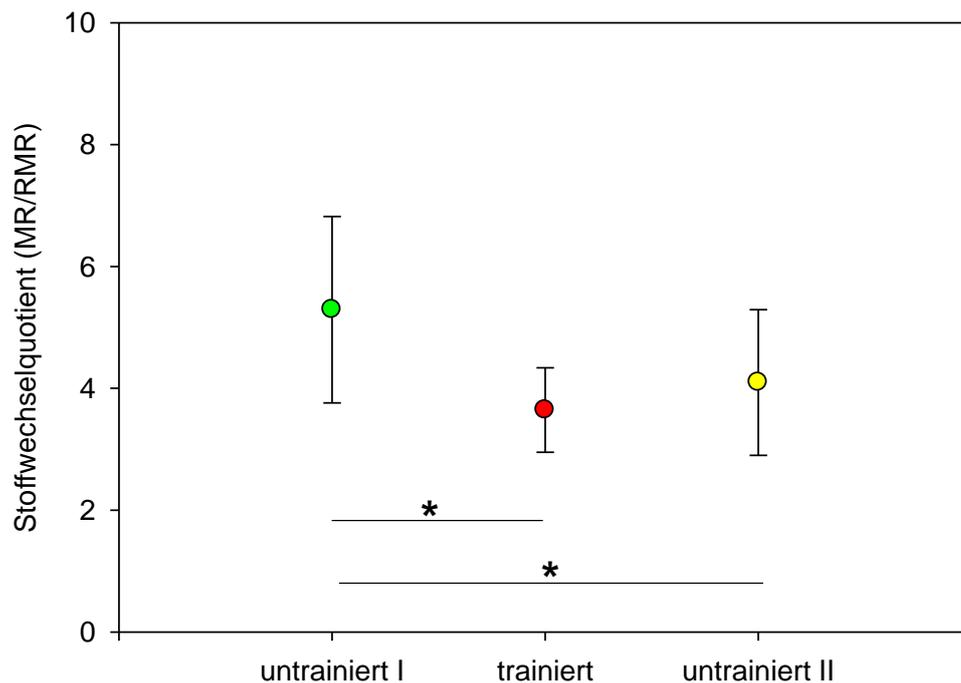


Abbildung 23: Stoffwechselquotient unter spezifischer Belastung (MR/RMR) von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

2.2. Korrelation von Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme

Ob eine Korrelation zwischen der Herzfrequenz und der relativen Sauerstoffaufnahme besteht, wurde anhand der Werte der Ruhemessungen und des Schwellentests (bei allen drei Geschwindigkeiten) getestet. Dieser Test erfolgte für alle drei Messphasen (untrainiert I, trainiert, untrainiert II). Als unabhängige Variable fungierte die Herzfrequenz (x-Achse), als abhängige der Sauerstoffverbrauch (y-Achse).

Im untrainiert I-Zustand lautet die Gleichung der Regressionsgeraden

$y = 0,300x - 15,301$, R^2 (Bestimmtheitsmaß) beträgt 0,707, R (Korrelationskoeffizient) ist 0,841 (Abbildung 24). Für trainierte Hunde ergab sich folgende Gleichung:

$y = 0,387x - 22,015$, $R^2 = 0,829$, $R = 0,910$ (Abbildung 25). Die Gleichung für die Tiere nach der trainingsfreien Zeit lautet: $y = 0,226x - 8,812$, $R^2 = 0,637$, $R = 0,798$ (Abbildung 26).

Da sich die Daten der „untrainiert I“- und der „untrainiert II“-Hunde statistisch nicht voneinander unterscheiden (es wurde eine Kovarianzanalyse mit dem Sauerstoffverbrauch als abhängige Variable, der Herzfrequenz als Covariate und dem Trainingszustand als Faktor durchgeführt), wurden die Messwerte dieser beiden

Zustände unter „untrainiert“ zusammengefasst und anschließend gegen die Werte der trainierte Hunde getestet. Auch hier gab es keine signifikanten Unterschiede, weshalb sämtliche Datenpaare aller drei Messphasen zusammengefasst wurden (indem man für jeden Hund einen Mittelwert über alle drei Messphasen berechnet). So ergibt sich folgende Geradengleichung:

$$y = 0,312x - 16,382, R^2 = 0,802, R = 0,895 \text{ (Abbildung 27).}$$

Tabelle 6: Gleichungen der Regressionsgeraden jeweils im Zustand „untrainiert I“, „trainiert“, „untrainiert II“ und Gesamtgleichung über alle drei Messphasen. Mit Bestimmtheitsmaß (R^2) und Korrelationskoeffizient (R).

| Messphase | Geradengleichung | R^2 | R |
|------------------------|---|--------------|--------------|
| untrainiert I | $y = 0,300x - 15,301$ | 0,707 | 0,841 |
| trainiert | $y = 0,387x - 22,015$ | 0,829 | 0,910 |
| untrainiert II | $y = 0,226x - 8,812$ | 0,637 | 0,798 |
| Alle Messphasen | $y = 0,312x - 16,382$ | 0,802 | 0,895 |

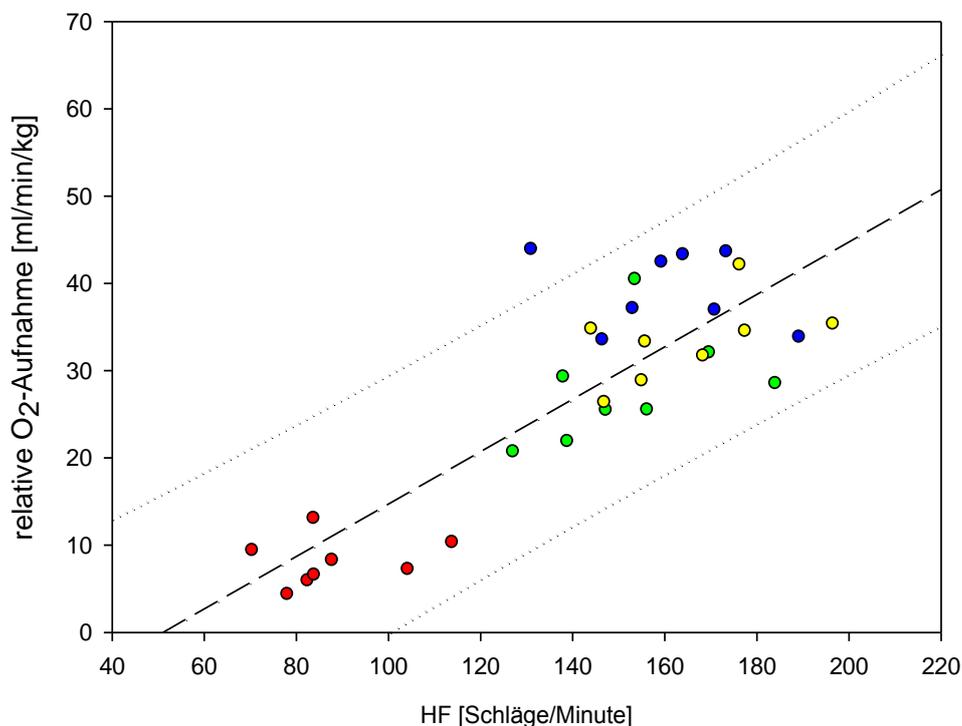


Abbildung 24: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme im Zustand „untrainiert I“ mit Regressionsgerade (---) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen).

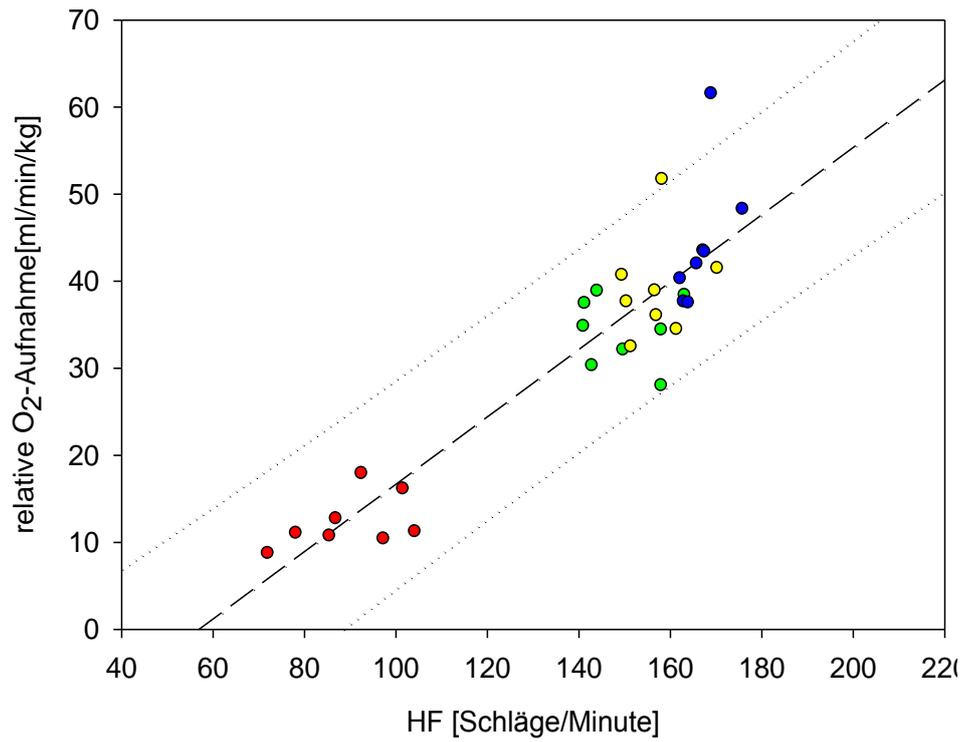


Abbildung 25: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme im trainierten Zustand mit Regressionsgerade (---) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen).

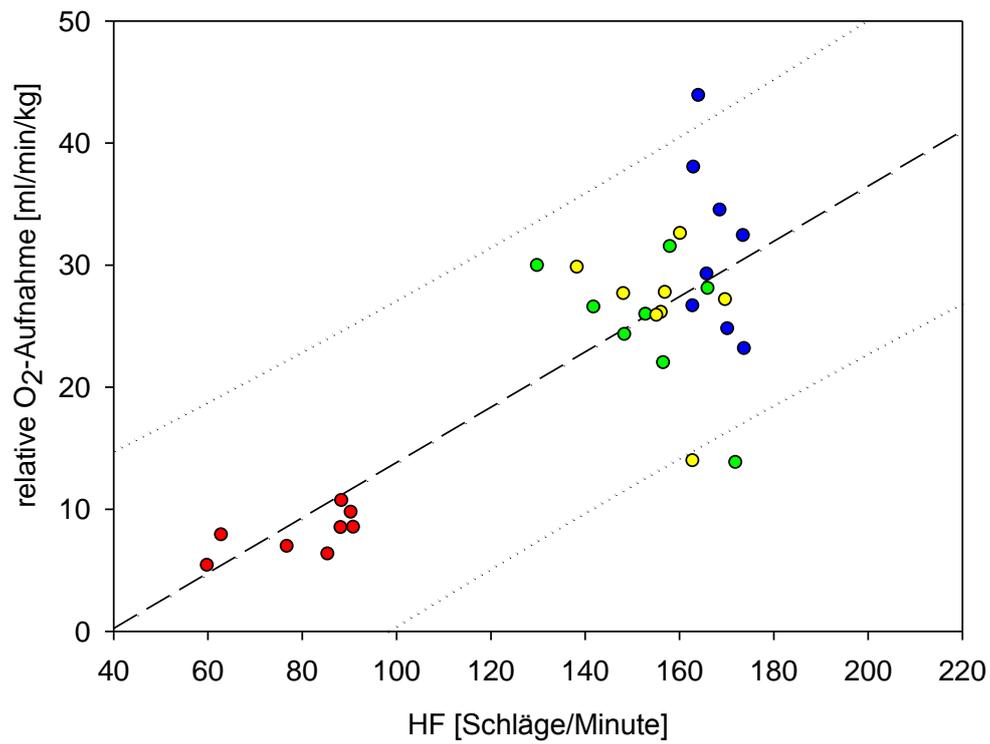


Abbildung 26: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme im Zustand „untrainiert II“ mit Regressionsgerade (- - - -) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen).

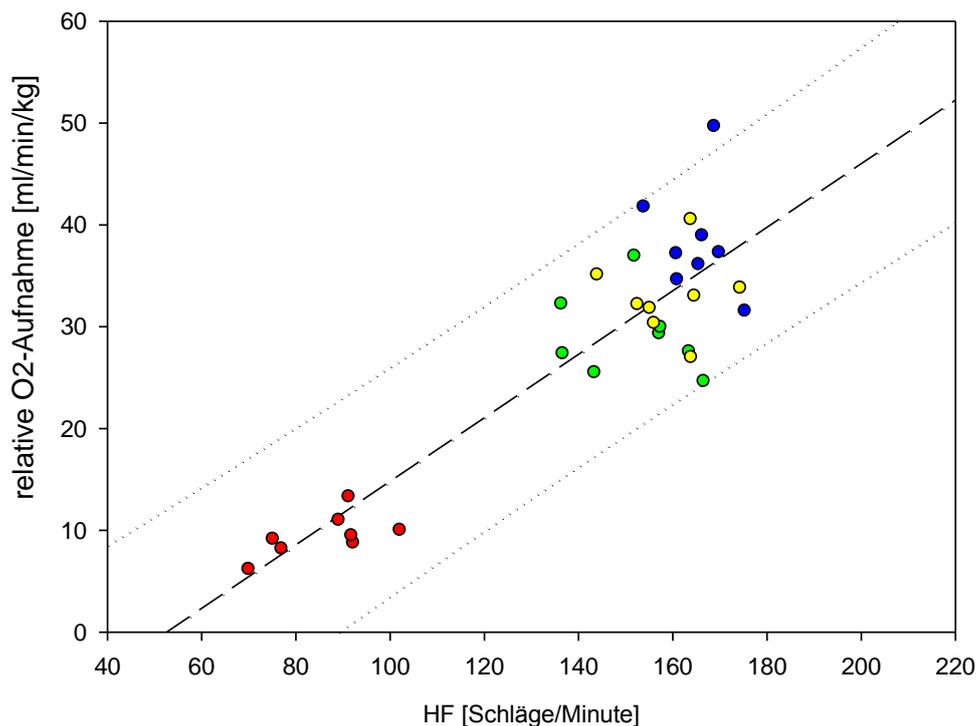


Abbildung 27: Korrelation von Herzfrequenz (HF) und Sauerstoffaufnahme mit Datenpaaren aller drei Messphasen mit Regressionsgerade (- - -) und Vorhersageintervallen (.....). Die verschiedenfarbigen Punkte kennzeichnen die unterschiedlichen Belastungen: Ruhe (•), 5km/h (•), 8km/h (•) und 12km/h (•), N=32 (8 Hunde a 4 Messungen).

2.3. Kohlendioxidabgabe

Die Kohlendioxidabgabe wurde wie auch die Sauerstoffaufnahme sowohl absolut [l/min], als auch in Relation zum Körpergewicht der Tiere [ml/min/kg KM] aufgezeichnet.

2.3.1. Kohlendioxidabgabe in Ruhe

Sowohl die absolute, wie auch die relative Kohlendioxidabgabe in Ruhe zeigten statistisch signifikante Unterschiede. Training bewirkte einen eindeutigen Anstieg der absoluten Kohlendioxidproduktion ($p = 0,021$, rm ANOVA on Ranks) die nach der trainingsfreien Zeit wieder deutlich abnahm ($F_{1,19} = 19,849$, $p = 0,002$, rm ANOVA) (Abbildung 28).

Ähnlich verhielt es sich mit der relativen Kohlendioxidabgabe. Auch hier konnte ein deutlicher Anstieg durch das Training ($p = 0,002$, rm ANOVA on Ranks) und ein erneuter Abfall nach der trainingsfreien Zeit beobachtet werden ($F_{1,19} = 24,369$, $p < 0,001$, rm ANOVA) (Abbildung 28).

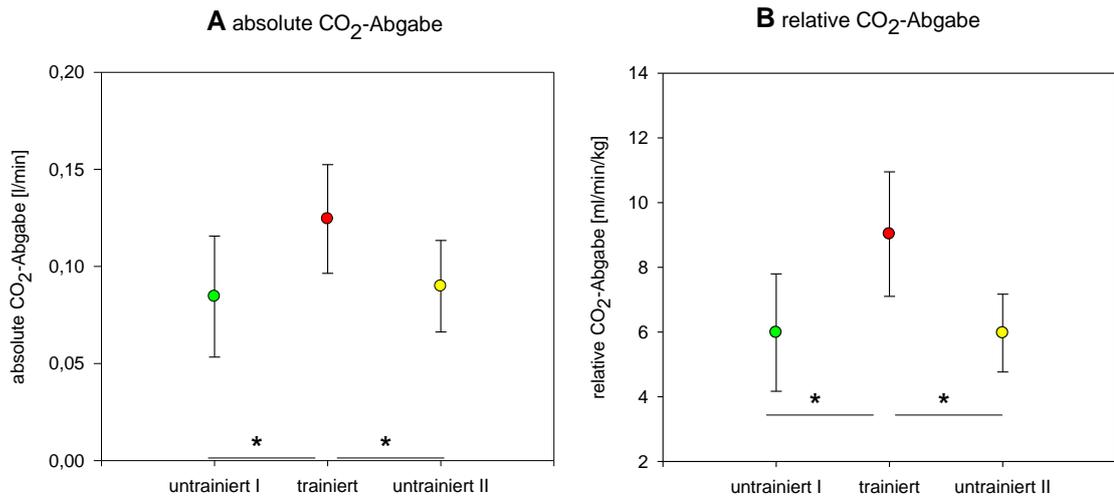


Abbildung 28: Drei-Minuten-Mittelwerte der absoluten (A) und der relativen (B) Kohlendioxidabgabe in Ruhe von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

2.3.2. Kohlendioxidabgabe unter Belastung

Betrachtet man die absolute Kohlendioxidabgabe [l/min], so konnte bei 5km/h ($F_{1,15} = 8,748$, $p = 0,021$, rm ANOVA), 8km/h ($F_{1,15} = 17,410$, $p = 0,004$, rm ANOVA) und 12km/h ($F_{1,15} = 19,638$, $p = 0,003$, rm ANOVA) jeweils ein signifikanter Unterschied zwischen den trainierten und den Tieren nach der trainingsfreien Zeit beobachtet werden. Die Hunde im Zustand „untrainiert II“ zeigten in allen Fällen einen signifikanten Abfall der Kohlendioxidabgabe im Vergleich zu den trainierten Hunden (Abbildung 29).

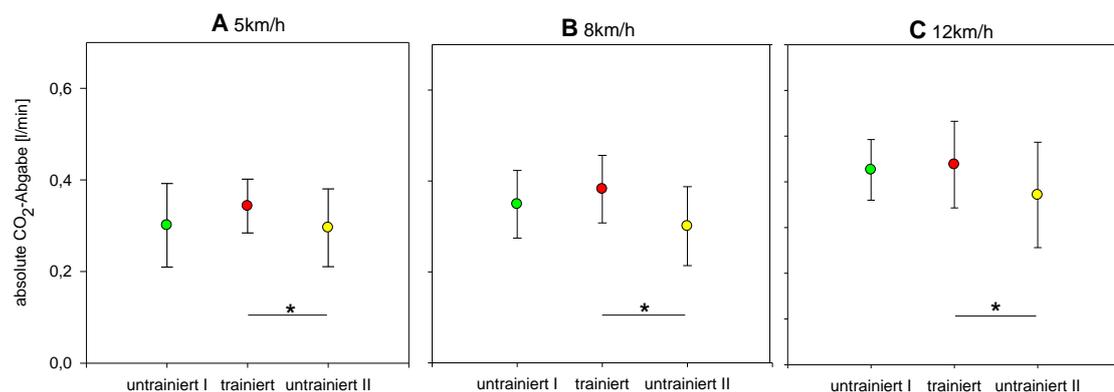


Abbildung 29: Drei-Minuten-Mittelwerte der absoluten Kohlendioxidabgabe unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

Mit der relativen Kohlendioxidabgabe verhielt es sich dagegen anders. Bei 5km/h konnte – wie auch bei den absoluten Werten – ein signifikanter Abfall der

Kohlendioxidabgabe in der untrainiert II-Messphase im Vergleich zur Trainings-Messphase nachgewiesen werden ($F_{1,15} = 43,206$, $p < 0,001$, rm ANOVA). Bei einer Laufgeschwindigkeit von 8km/h wurde nicht nur ein signifikanter Unterschied zwischen Hunden in den Zuständen „trainiert“ und „untrainiert II“ ($F_{1,15} = 18,594$, $p = 0,004$, rm ANOVA), sondern auch zwischen den Tieren in den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“ ($F_{1,15} = 9,373$, $p = 0,018$, rm ANOVA) nachgewiesen. Dies zeigte sich in gleicher Weise auch bei einer Geschwindigkeit von 12km/h. Allerdings kam es hier zusätzlich zum Abfall der Kohlendioxidabgabe in der trainingsfreien Zeit im Vergleich zu den trainierten Tieren ($F_{1,15} = 35,780$, $p < 0,001$, rm ANOVA) auch zu einem signifikanten Unterschied zwischen den untrainiert I- und untrainiert II-Werten ($F_{1,15} = 11,779$, $p = 0,011$, rm ANOVA) (Abbildung 30).

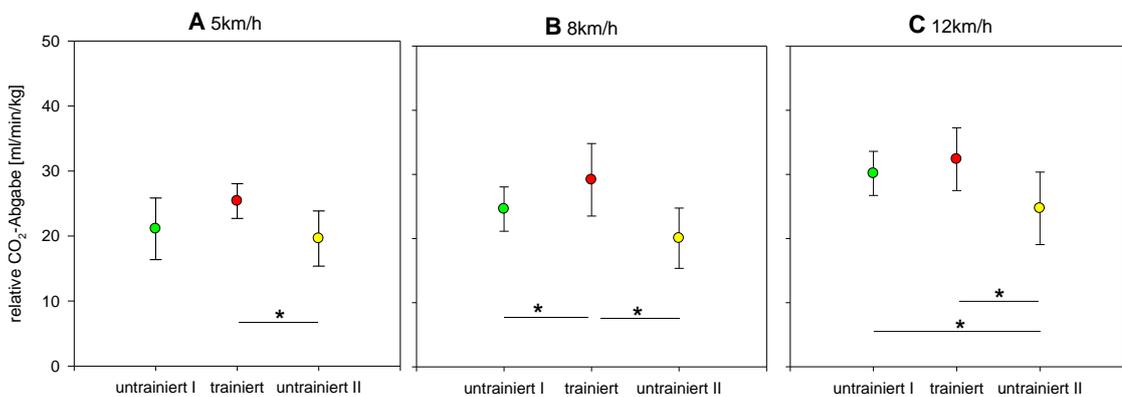


Abbildung 30: Drei-Minuten-Mittelwerte der relativen Kohlendioxidabgabe unter Belastung von acht Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (*), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

2.4. Atemfrequenz

2.4.1. Atemfrequenz in Ruhe

Bei der Atemfrequenz in Ruhe wurde durch das Training keine Änderung erzielt. Allerdings kam es nach der trainingsfreien Zeit zu einem statistisch signifikanten Anstieg ($F_{1,19} = 9,625$, $p = 0,013$, rm ANOVA) der Atemzüge pro Minute (Abbildung 31) im Vergleich zur Messung nach der Trainingsperiode.

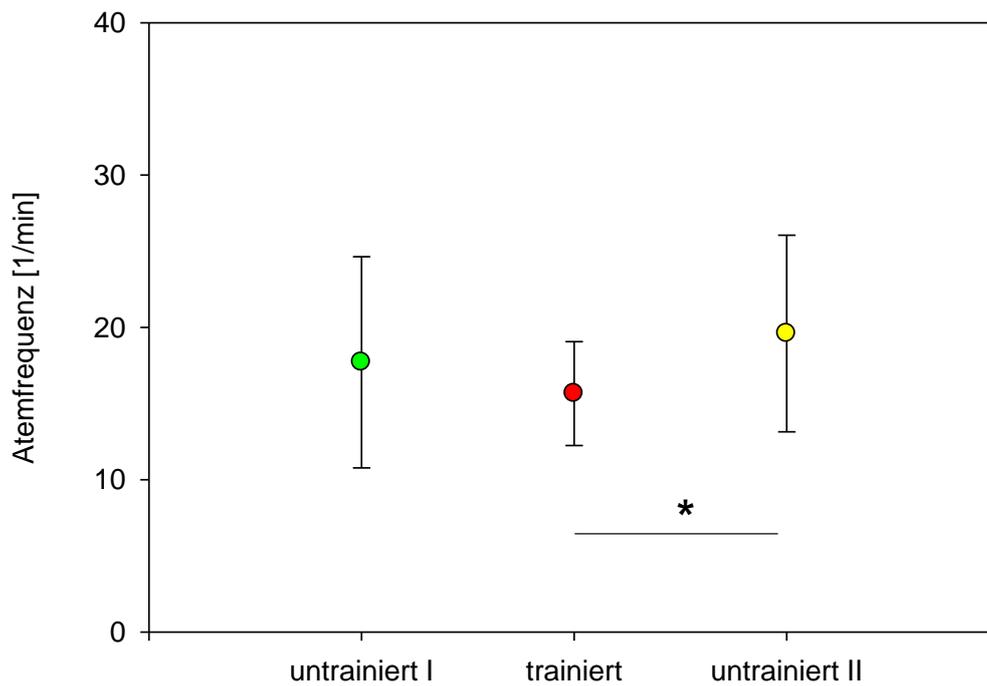


Abbildung 31: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemfrequenzen in Ruhe von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•).

2.4.2. Atemfrequenz unter Belastung

Je nach gelaufener Geschwindigkeit konnten verschiedene, teils statistisch signifikante Veränderungen der Atemfrequenz unter Belastung in den einzelnen Messphasen beobachtet werden.

Bei 5km/h und 8km/h gab es keine Unterschiede zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“. Jedoch konnte ein signifikanter Anstieg der Atemfrequenz der „untrainiert II“- Hunde im Vergleich zu den trainierten ermittelt werden (5km/h: $F_{1,15} = 6,246$, $p = 0,041$, rm ANOVA; 8km/h: $F_{1,15} = 9,474$, $p = 0,018$, rm ANOVA).

Anders verhielt es sich bei 12km/h. Die Atemfrequenz war bei den Hunden im Zustand „untrainiert I“ ($F_{1,1} = 9,179$, $p = 0,019$, rm ANOVA) und „untrainiert II“ ($F_{1,15} = 30,030$, $p < 0,001$, rm ANOVA) höher, jeweils im Vergleich zum trainierten Zustand (Abbildung 32).

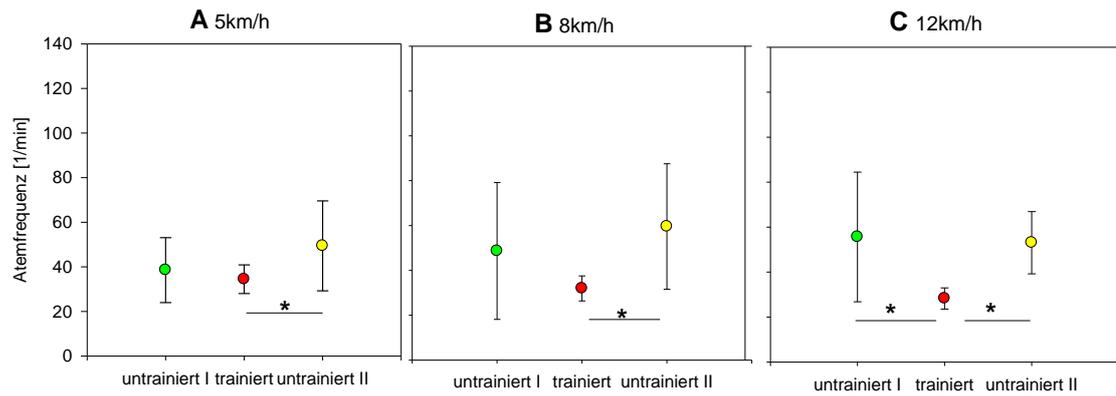


Abbildung 32: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemfrequenzen unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

2.5. Expirationsvolumen

2.5.1. Expirationsvolumen in Ruhe

Das Expirationsvolumen in Ruhe stieg durch das Ausdauertraining statistisch signifikant an ($F_{1,19} = 32,202$, $p < 0,001$, rm ANOVA), um nach der trainingsfreien Zeit ebenfalls statistisch signifikant wieder abzufallen ($F_{1,19} = 37,356$, $p < 0,001$, rm ANOVA) (Abbildung 33).

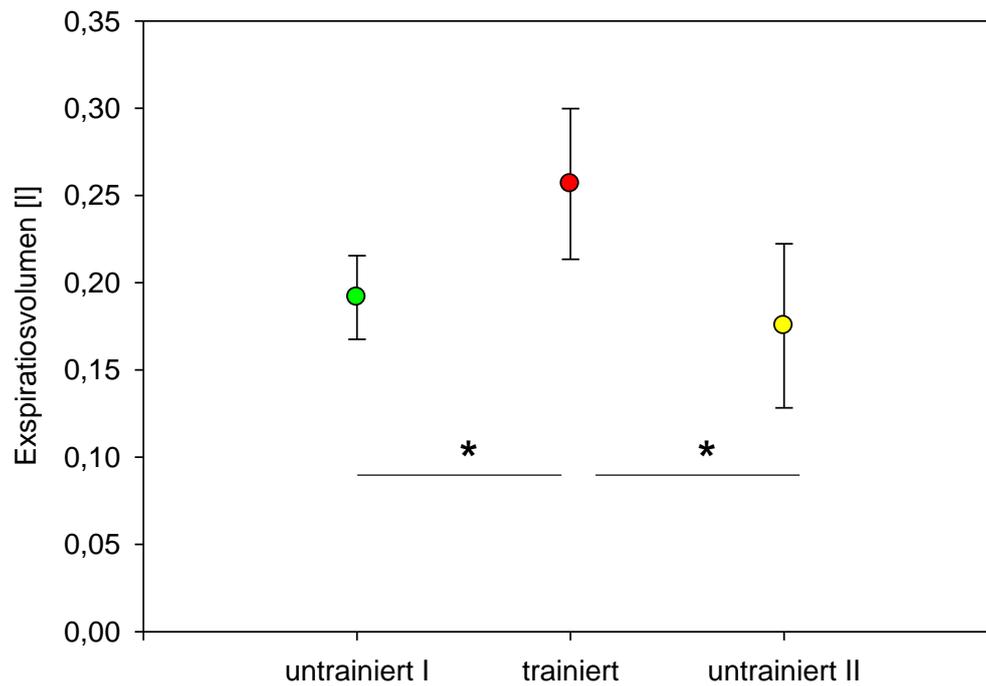


Abbildung 33: Drei-Minuten-Mittelwerte der Expirationsvolumina in Ruhe von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

2.5.2. Expirationsvolumen unter Belastung

Das Expirationsvolumen unter Belastung zeigte sowohl bei 5km/h ($F_{1,15} = 50,009$, $p < 0,001$, rm ANOVA) als auch bei 8km/h ($F_{1,15} = 23,341$, $p = 0,002$, rm ANOVA) einen statistisch signifikanten Abfall in der untrainiert II-Messphase gegenüber der Trainings-Messphase. Bei 12km/h konnten signifikante Unterschiede zwischen den Hunden in den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“ ($F_{1,15} = 15,659$, $p = 0,005$, rm ANOVA) sowie „trainiert“ und „untrainiert II“ ($F_{1,15} = 37,253$, $p < 0,001$, rm ANOVA) beobachtet werden (Abbildung 34).

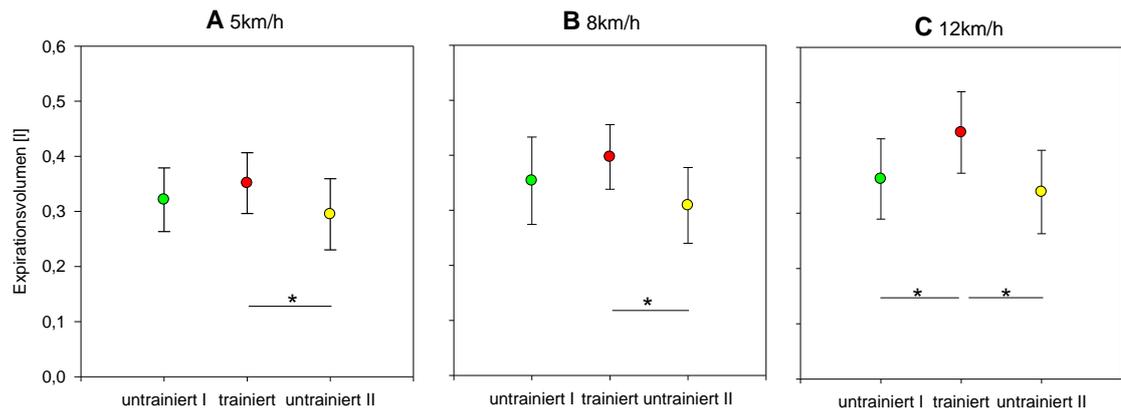


Abbildung 34: Drei-Minuten-Mittelwerte der Expirationsvolumina unter Belastung von acht Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

2.6. Atemminutenvolumen

2.6.1. Atemminutenvolumen in Ruhe

Das Ausdauertraining bewirkte einen statistisch signifikanten Anstieg des Atemminutenvolumens ($F_{1,19} = 5,450$, $p = 0,044$, rm ANOVA), welches nach der trainingsfreien Zeit wieder deutlich abfiel ($F_{1,19} = 6,745$, $p = 0,029$, rm ANOVA) (Abbildung 35).

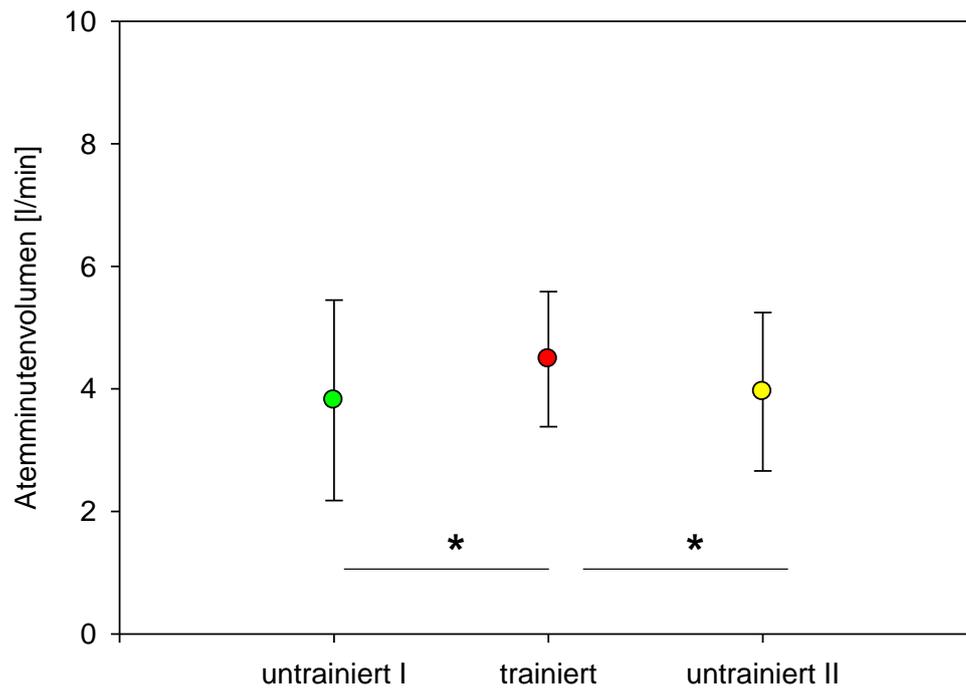


Abbildung 35: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemminutenvolumina in Ruhe von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

2.6.2. Atemminutenvolumen unter Belastung

Bei einer Laufgeschwindigkeit von 5km/h ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Trainingszuständen. Bei 8km/h konnte ein Anstieg des Atemminutenvolumens vom trainierten zum „untrainiert II“-Zustand beobachtet werden ($F_{1,15} = 5,736$, $p = 0,048$, rm ANOVA). Bei 12km/h kam es zu einem Abfall des Atemminutenvolumens von Messphase „untrainiert I“ zu Messphase „trainiert“ ($F_{1,15} = 7,722$, $p = 0,027$, rm ANOVA) sowie zu einem Anstieg von Messphase „trainiert“ zu Messphase „untrainiert II“ ($F_{1,15} = 21,782$, $p = 0,002$, rm ANOVA) (Abbildung 36).

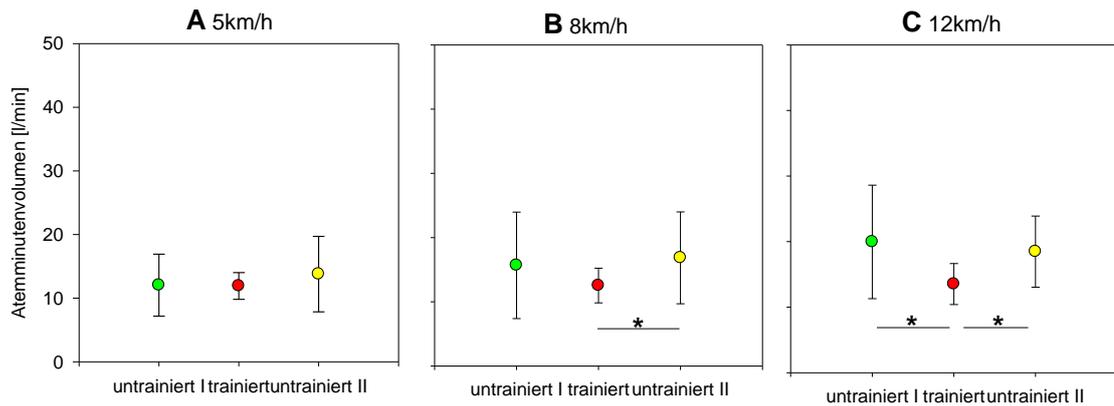


Abbildung 36: Drei-Minuten-Mittelwerte der Atemminutenvolumina unter Belastung von acht Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

3. Echokardiographie

3.1. Herzstruktur

3.1.1. Wanddicken des linken Ventrikels und des Septums

Bei der Vermessung der Wanddicken des linken Ventrikels konnten während der Systole keine signifikanten Veränderungen zwischen den verschiedenen Trainingszuständen festgestellt werden. Anders während der Diastole. Hier waren die Herzwände der „untrainiert I“- ($F_{1,19} = 5,516$, $p = 0,043$, rm ANOVA) bzw. der trainierten ($F_{1,19} = 12,694$, $p = 0,006$, rm ANOVA) Tiere signifikant dicker im Vergleich zu den „untrainiert II“-Tieren (Tabelle 7).

Die Wanddicke des Septums zeigte sowohl während der Diastole als auch während der Systole statistisch signifikante Unterschiede. Während beider Herzaktionsphasen war das Septum der „untrainiert II“-Hunde im Vergleich zu den „untrainiert I“-Hunden (Diastole: $F_{1,19} = 12,502$, $p = 0,006$, rm ANOVA; Systole: $F_{1,19} = 18,156$, $p = 0,002$, rm ANOVA) und im Vergleich zu den trainierten (Diastole: Werte nicht normal verteilt, $p = 0,021$, rm ANOVA on Ranks; Systole: $F_{1,19} = 10,991$, $p = 0,009$, rm ANOVA) Tieren signifikant dünner (Tabelle 7).

3.1.2. Durchmesser des linken Ventrikels

Training bewirkte eine Verkleinerung sowohl des enddiastolischen als auch des endsystolischen Durchmessers des linken Ventrikels. Der endsystolische Durchmesser der Kammer zeigte im trainierten Zustand einen signifikant geringeren Wert im Vergleich zum Zustand „untrainiert I“ ($F_{1,19} = 18,878$, $p = 0,002$, rm ANOVA) und „untrainiert II“ ($F_{1,19} = 16,379$, $p = 0,003$, rm ANOVA). Ebenso verhielt es sich mit dem enddiastolischen Durchmesser des linken Ventrikels. Auch hier konnte eine signifikante Verkleinerung des Durchmessers der trainierten Hunde im Vergleich zu den „untrainiert I“- ($F_{1,19} = 9,602$, $p = 0,013$, rm ANOVA) bzw. „untrainiert II“-Tieren ($F_{1,19} = 10,315$, $p = 0,011$, rm ANOVA) beobachtet werden (Tabelle 7).

3.1.3. Aortendurchmesser

Am Durchmesser der Aorta konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zuständen „untrainiert I“, „trainiert“ und „untrainiert II“ festgestellt werden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) der echokardiographischen Parameter: Dicken des linken Ventrikels (LV) in Diastole und Systole, Dicken des Septums in Diastole und Systole, Durchmesser des linken Ventrikels in Diastole und Systole und Aortendurchmesser jeweils im Zustand „untrainiert I“, „trainiert“ und „untrainiert II“.

| <i>echokardiographischer Parameter</i> | <i>MW±s untrainiert I</i> | <i>MW±s trainiert</i> | <i>MW±s untrainiert II</i> |
|---|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Dicke LV Diastole [mm] | 9,47 ± 1,38 | 9,47 ± 1,45 | 8,61 ± 1,17 |
| Dicke LV Systole [mm] | 11,88 ± 1,43 | 12,76 ± 2,11 | 12,46 ± 1,44 |
| Dicke Septum Diastole [mm] | 9,72 ± 1,22 | 9,82 ± 1,73 | 8,74 ± 1,26 |
| Dicke Septum Systole [mm] | 11,93 ± 0,96 | 12,39 ± 1,61 | 10,92 ± 0,83 |
| Durchmesser LV Diastole [mm] | 31,40 ± 2,90 | 29,51 ± 3,02 | 31,72 ± 2,88 |
| Durchmesser LV Systole [mm] | 22,72 ± 3,46 | 19,30 ± 3,46 | 22,16 ± 2,30 |
| Aortendurchmesser [cm] | 1,6 ± 0,1 | 1,7 ± 0,1 | 1,7 ± 0,1 |

3.2. Herzfunktionsparameter

3.2.1. Verkürzungsfraction

Auch die Verkürzungsfraction stieg durch das Training statistisch signifikant an ($F_{1,19} = 13,125$, $p = 0,006$, rm ANOVA) und fiel durch die trainingsfreie Zeit wieder ab ($p = 0,021$, rm ANOVA on Ranks) (Abbildung 37).

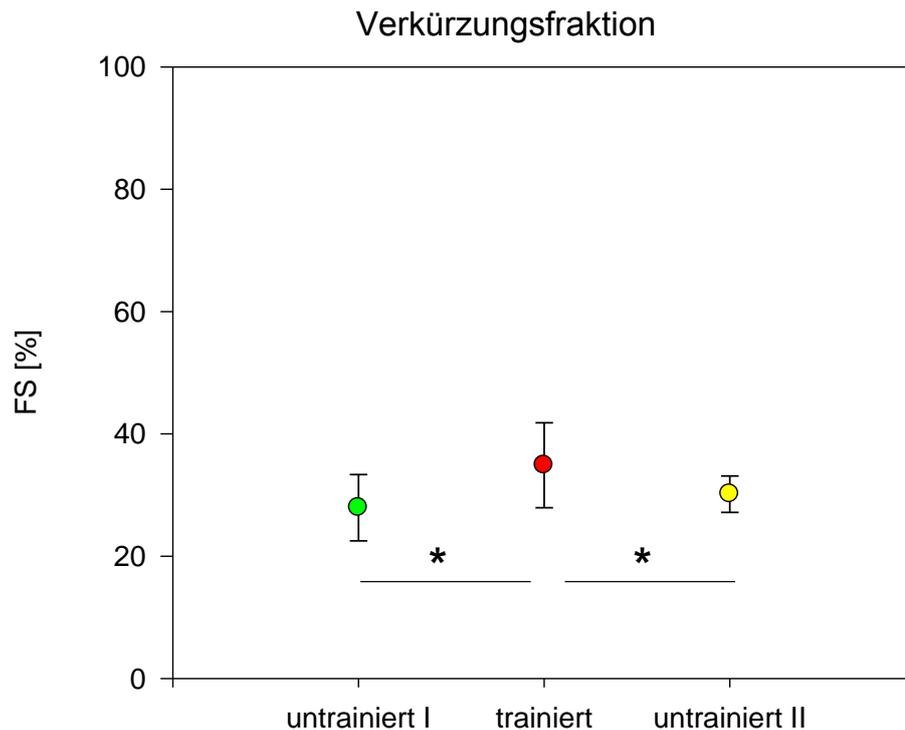


Abbildung 37: Verkürzungsfraction (FS) von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

3.2.2. Schlagvolumen

Das Schlagvolumen zeigte während allen drei Messphasen einen konstanten Wert (Tabelle 8).

3.2.3. Maximale Auswurfgeschwindigkeit

Bei der maximalen Auswurfgeschwindigkeit konnte lediglich ein signifikanter Unterschied zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ ($F_{1,19} = 7,914$, $p = 0,020$, rm ANOVA), nicht jedoch zwischen „untrainiert I“ und „trainiert“, bzw. „trainiert“ und „untrainiert II“ nachgewiesen werden (Tabelle 8).

3.2.4. Geschwindigkeits-Zeit-Integral

Das Geschwindigkeits-Zeit-Integral war bei den „untrainiert I“-Hunden signifikant höher als bei den trainierten Hunden ($F_{1,19} = 11,579$, $p = 0,008$, rm ANOVA). Zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ konnte ebenfalls ein signifikanter Unterschied ermittelt werden ($F_{1,19} = 15,105$, $p = 0,004$, rm ANOVA) (Tabelle 8).

Tabelle 8: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) der Herzfunktionsparameter.

| <i>Herzfunktionsparameter</i> | <i>MW±s untrainiert I</i> | <i>MW±s trainiert</i> | <i>MW±s untrainiert II</i> |
|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Verkürzungsfraction [%] | 27,9 ± 5,4 | 34,9 ± 6,9 | 30,2 ± 3,0 |
| Schlagvolumen [%] | 7,0 ± 1,3 | 6,5 ± 1,8 | 6,2 ± 1,5 |
| Max. Auswurfgeschwindigkeit [cm/s] | 19,3 ± 2,3 | 17,6 ± 2,1 | 17,0 ± 2,1 |
| Geschwindigkeits-Zeit-Integral [cm] | 3,3 ± 0,3 | 2,9 ± 0,4 | 2,7 ± 0,4 |

4. Elektrokardiogramm

4.1. Ruhe-EKG

4.1.1. Mittlere Herzfrequenz

Die mittlere Herzfrequenz in Ruhe ergab signifikante Unterschiede zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“ ($p = 0,021$, rm ANOVA on Ranks) und zwischen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ ($F_{1,19} = 11,359$, $p = 0,008$, rm ANOVA). In beiden Fällen kam es zu einem deutlichen Abfall der mittleren Herzfrequenzen (Abbildung 38).

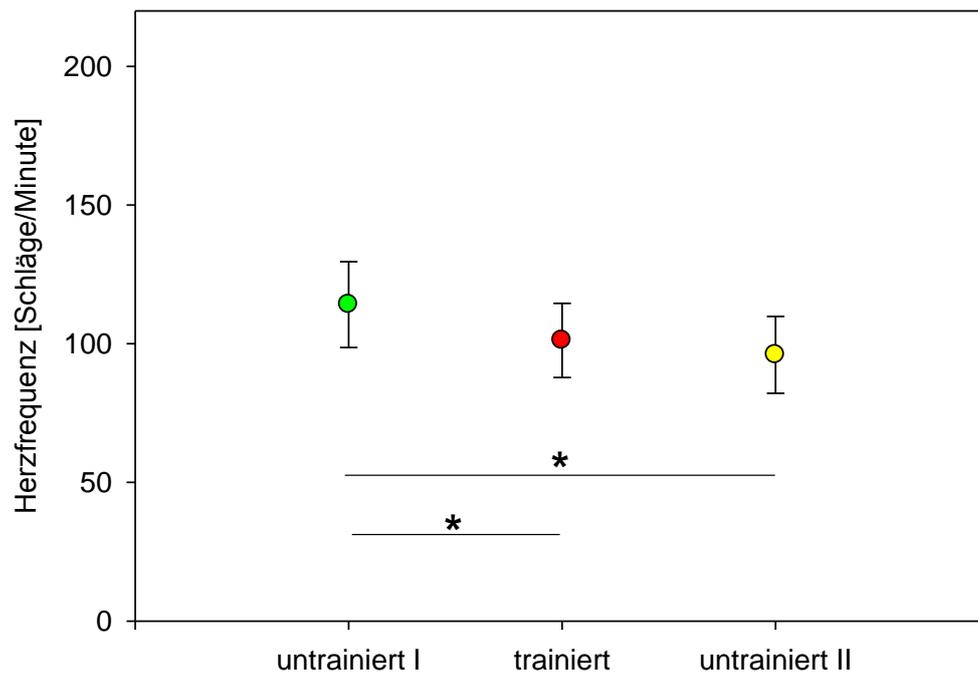


Abbildung 38: Mittlere Ruhe-Herzfrequenz von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

4.1.2. Maximale Herzfrequenz

Die Auswertung der maximalen Herzfrequenzen in Ruhe ergab einen statistisch signifikanten Abfall im trainierten ($F_{1,19} = 5,199$, $p = 0,049$, rm ANOVA) und im „untrainiert II“-Zustand ($F_{1,19} = 7,147$, $p = 0,025$, rm ANOVA), jeweils im Vergleich zu den „untrainiert I“-Tieren (Abbildung 39).

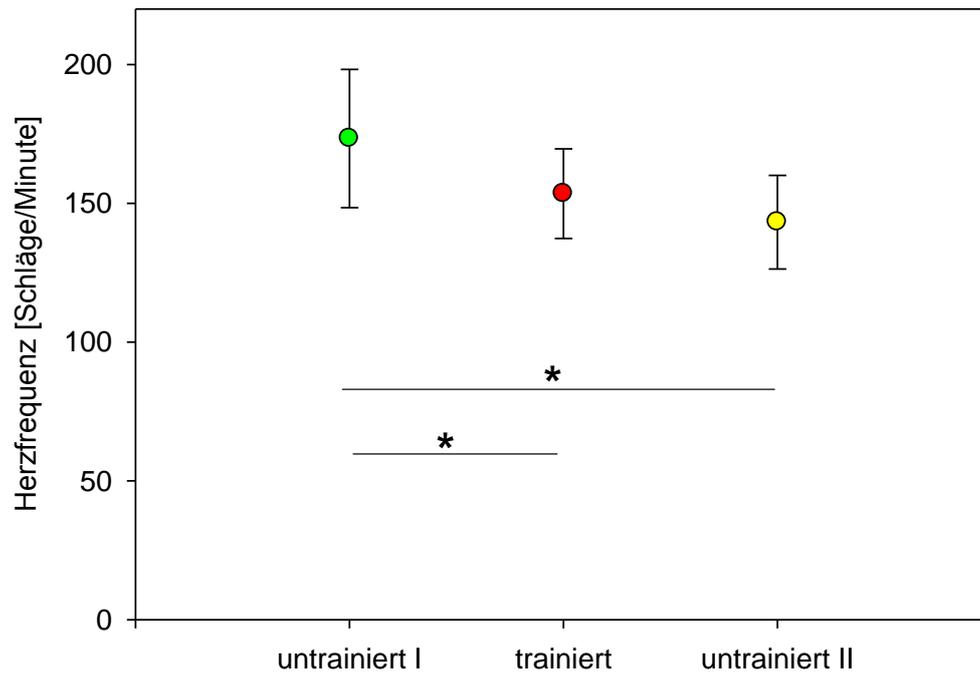


Abbildung 39: maximale Ruhe-Herzfrequenz von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•).

4.1.3. Minimale Herzfrequenz

Bei der minimalen Herzfrequenz in Ruhe konnten keinerlei Unterschiede zwischen den Zuständen „untrainiert I“ (Mittelwert: $66,533 \pm 12,488$ Schläge/Minute), „trainiert“ (Mittelwert: $58,565 \pm 11,266$ Schläge/Minute) und „untrainiert II“ (Mittelwert: $61,792 \pm 13,550$ Schläge/Minute) beobachtet werden (Abbildung 40).

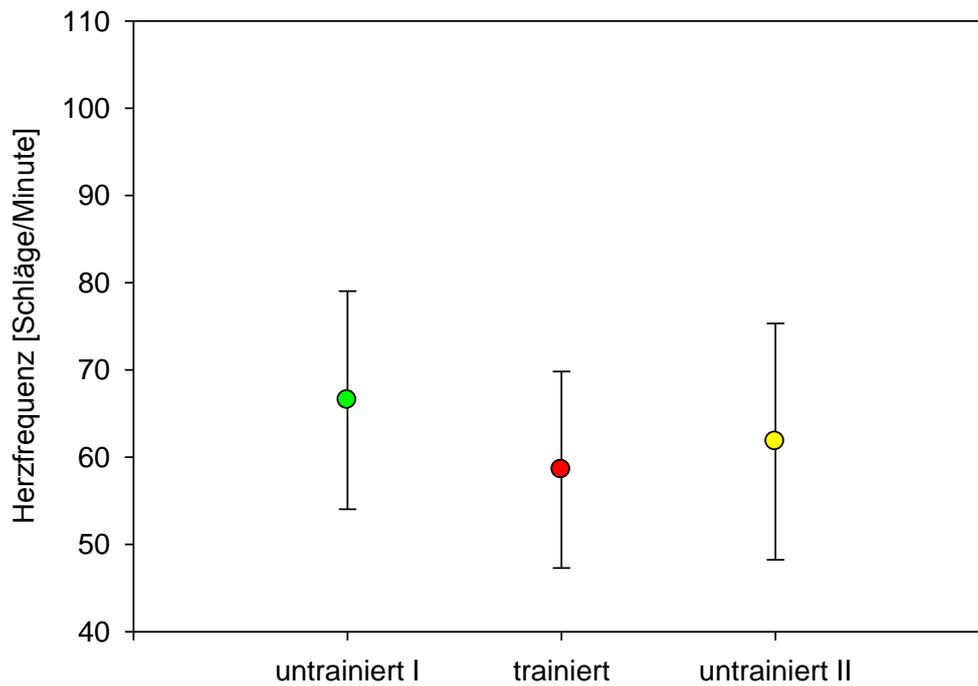


Abbildung 40: minimale Ruhe-Herzfrequenz von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•).

4.2. Belastungs-EKG

4.2.1. Mittlere Herzfrequenz

Die mittlere Herzfrequenz ergab bei allen drei Laufgeschwindigkeiten (also 5km/h, 8km/h und 12km/h) keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Zuständen „untrainiert I“, „trainiert“ und „untrainiert II“ (Tabelle 9).

Tabelle 9: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) der mittleren Herzfrequenz in den jeweiligen Geschwindigkeiten und Messphasen;

| | MW \pm s untrainiert I | MW \pm s trainiert | MW \pm s untrainiert II |
|---------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 5km/h | 150,587 \pm 18,005 | 145,402 \pm 12,403 | 146,858 \pm 16,543 |
| 8km/h | 161,601 \pm 18,161 | 150,995 \pm 9,966 | 155,661 \pm 11,380 |
| 12km/h | 179,677 \pm 13,607 | 169,123 \pm 7,941 | 171,909 \pm 10,215 |

4.2.2. Maximale Herzfrequenz

Bei einer Laufgeschwindigkeit von 5km/h sank die maximale Herzfrequenz der Hunde nach der trainingsfreien Zeit im Vergleich zu den trainierten Tieren statistisch signifikant ab ($F_{1,19} = 5,364$, $p = 0,046$, rm ANOVA). Zu keinerlei signifikanten Unterschieden kam es dagegen bei einer Geschwindigkeit von 8km/h. Bei 12km/h hingegen konnte wiederum eine Abnahme der maximalen Herzfrequenz im Zustand „untrainiert II“ im Vergleich zu den trainierten Hunden beobachtet werden ($F_{1,18} = 8,922$, $p = 0,017$, rm ANOVA) (Abbildung 41).

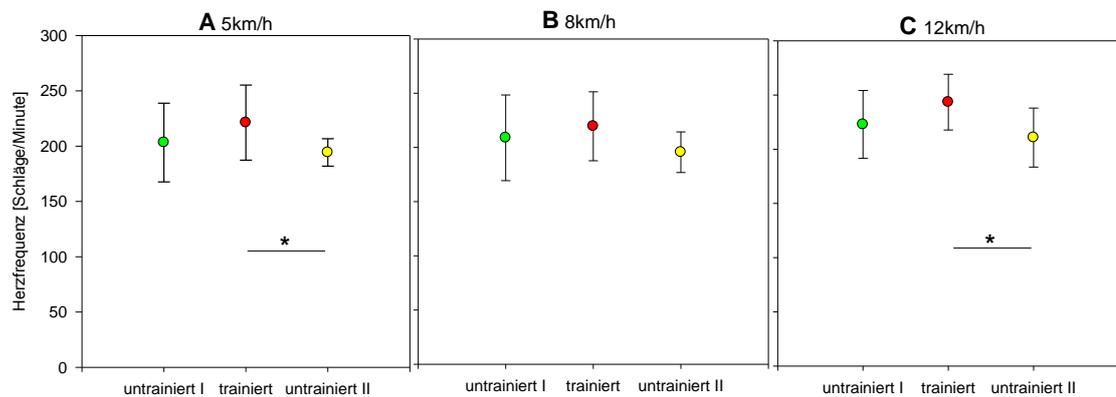


Abbildung 41: Maximale Herzfrequenzen unter Belastung von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

4.2.3. Minimale Herzfrequenz

Bei einer Laufgeschwindigkeit von 5km/h konnte eine statistisch signifikante Zunahme der minimalen Herzfrequenzen der „untrainiert II“-Tiere beobachtet werden, jeweils im Vergleich zum Zustand „untrainiert I“ ($F_{1,19} = 7,374$, $p = 0,024$, rm ANOVA) und „trainiert“ ($F_{1,19} = 5,529$, $p = 0,043$, rm ANOVA). Zu keinen signifikanten Unterschieden kam es bei einer Geschwindigkeit von 8km/h. Allerdings konnte bei 12km/h wiederum eine signifikante Zunahme der minimalen Herzfrequenzen der „untrainiert II“-Hunde im Vergleich zu den „untrainiert I“- ($F_{1,18} = 8,460$, $p = 0,020$, rm ANOVA) und den trainierten ($F_{1,18} = 29,331$, $p < 0,001$, rm ANOVA) Hunden ermittelt werden (Abbildung 42).

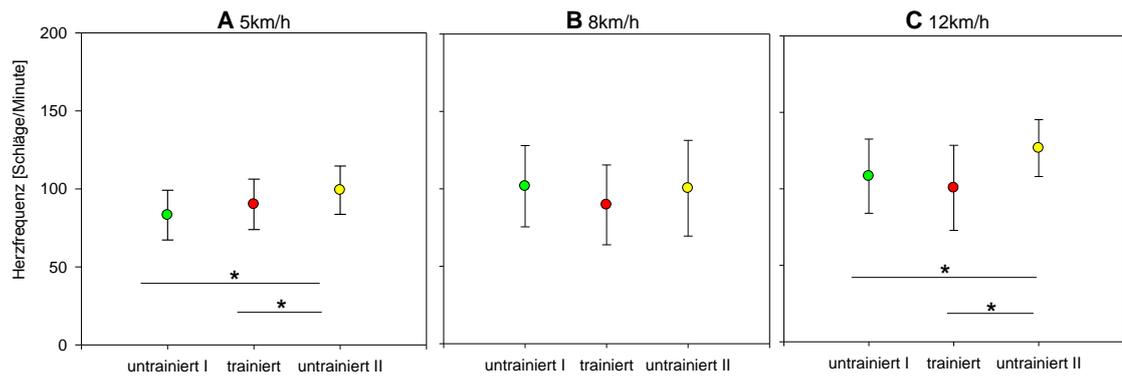


Abbildung 42: Minimale Herzfrequenzen unter Belastung von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●); jeweils bei 5km/h (A), 8km/h (B) und 12km/h (C).

5. Muskeldicken

5.1. M. supraspinatus und M. trapezius

Bei den Vermessungen des M. supraspinatus und des M. trapezius konnten keine statistisch signifikanten Veränderungen zwischen den 3 Messphasen ermittelt werden (Tabelle 10).

5.2. M. infraspinatus und M. deltoideus

Auch beim M. infraspinatus und M. deltoideus hatte weder Training noch die trainingsfreie Zeit einen statistisch signifikanten Effekt auf die Muskeldicke (Tabelle 10).

5.3. M. biceps femoris und M. vastus lateralis

Das Training bewirkte beim M. biceps femoris bzw. M. vastus lateralis eine statistisch signifikante Abnahme der Muskeldicke ($p = 0,002$, rm ANOVA on Ranks). Kein Effekt zeigte sich nach der trainingsfreien Zeit (Abbildung 43 und Tabelle 10).

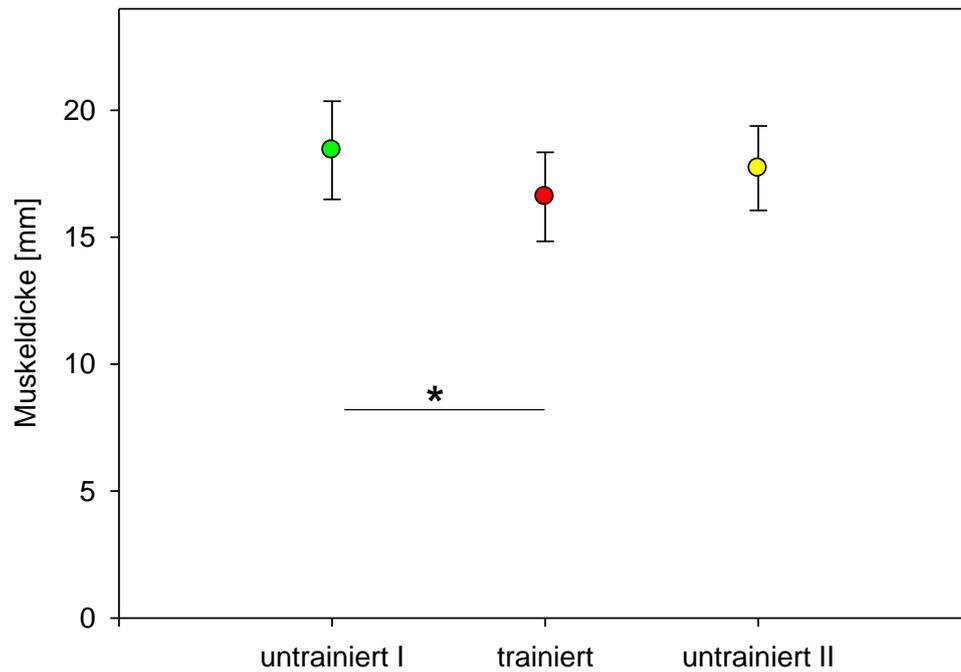


Abbildung 43: Dicke des M. biceps femoris bzw. M. vastus lateralis von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (•), „trainiert“ (•) und „untrainiert II“ (•).

5.4. M. longissimus dorsi

Die Dicke des M. longissimus dorsi veränderte sich durch das Training nicht signifikant. Allerdings konnte nach der trainingsfreien Zeit eine statistisch signifikante Dickenzunahme des Muskels gegenüber dem trainierten Zustand ermittelt werden ($F_{1,19} = 5,577$, $p = 0,042$, rm ANOVA) (Abbildung 44 und Tabelle 10).

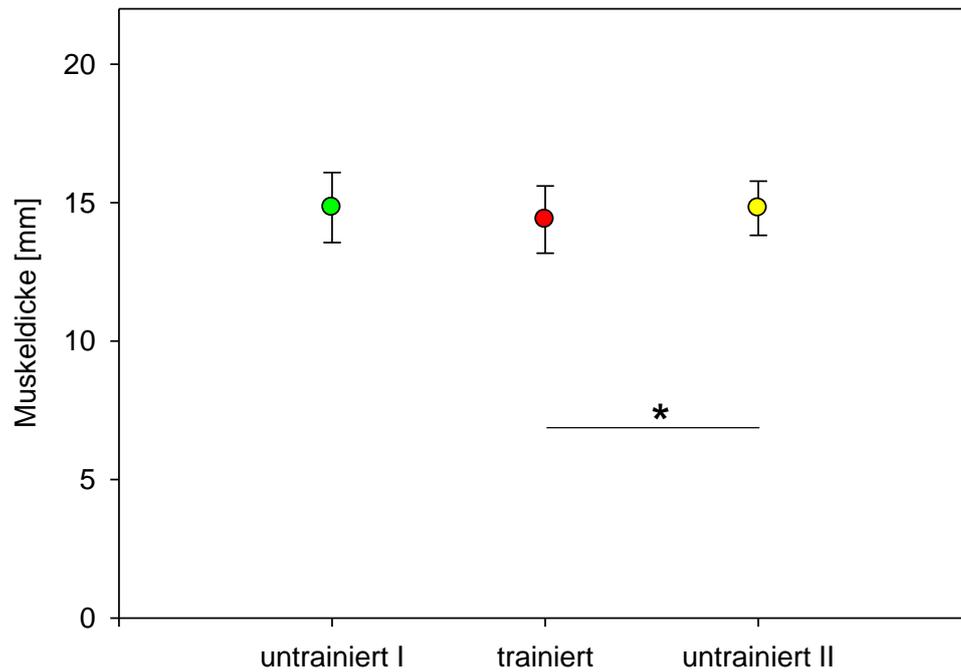


Abbildung 44: Dicke des M. longissimus dorsi von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

Tabelle 10: mittlere Muskeldicken von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“, „trainiert“ und „untrainiert II“.

| Muskel | untrainiert I [mm] | trainiert [mm] | untrainiert II [mm] |
|---|--------------------|----------------|---------------------|
| M. supraspinatus und M. trapezius | 18,40 ± 1,03 | 18,07 ± 0,78 | 17,98 ± 1,05 |
| M. infraspinatus und M. deltoideus | 19,27 ± 1,26 | 19,05 ± 0,55 | 19,10 ± 1,03 |
| M. biceps femoris und M. vastus lateralis | 18,43 ± 1,93 | 16,59 ± 1,75 | 17,72 ± 1,66 |
| M. longissimus dorsi | 14,83 ± 1,26 | 14,39 ± 1,21 | 14,80 ± 0,98 |

6. Temperaturmessungen

6.1. Innentemperaturen

Die Tagesmittelwerte der Temperaturen in den Hundeställen und am Laufband waren über den gesamten Versuchszeitraum relativ konstant. Sie sanken nie unter 17,1°C und

waren an keinem Tag höher als 24,8°C (mittlere Temperatur über den gesamten Versuchszeitraum: 21,1°C). Auch die Durchschnittstemperaturen der jeweiligen Messphasen waren nicht signifikant unterschiedlich (Tabelle 11 und Abbildung 45), somit waren relativ gleichbleibende Versuchsbedingungen gewährleistet.

Tabelle 11: Temperaturmaxima, -minima und -durchschnitte [MW±s] während den drei Messphasen.

| | Maximum [°C] | Minimum [°C] | Mittelwert [°C] | Standardabweichung |
|--------------------------|-----------------|--------------|--------------------|--------------------|
| Messphase UTI | 24,8 | 20,4 | 21,5 | 1,1 |
| Messphase T | 22,3 | 18,4 | 21,3 | 1,1 |
| Messphase UTH | 22,6 | 19,2 | 20,9 | 1,0 |

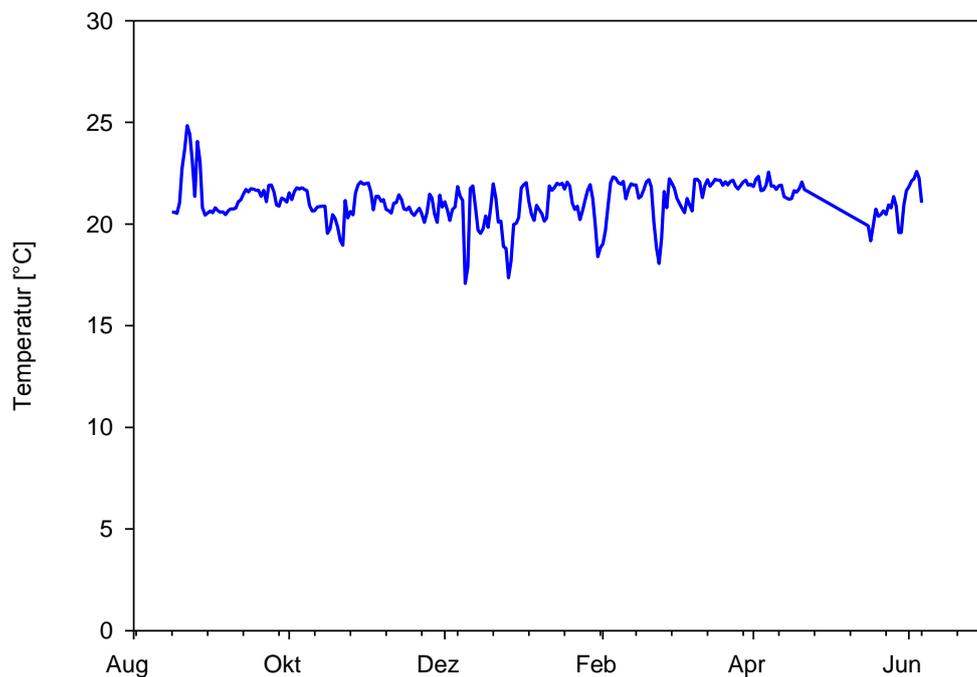


Abbildung 45: Temperaturkurve (Innentemperatur) über den gesamten Versuchszeitraum.

6.2. Außentemperaturen

Die Tagesmittelwerte der Außentemperaturen folgten dem jahreszeitlichen Rhythmus, was zu teils erheblichen Schwankungen der Außentemperaturen zwischen den einzelnen Messphasen führte (Abbildung 46).

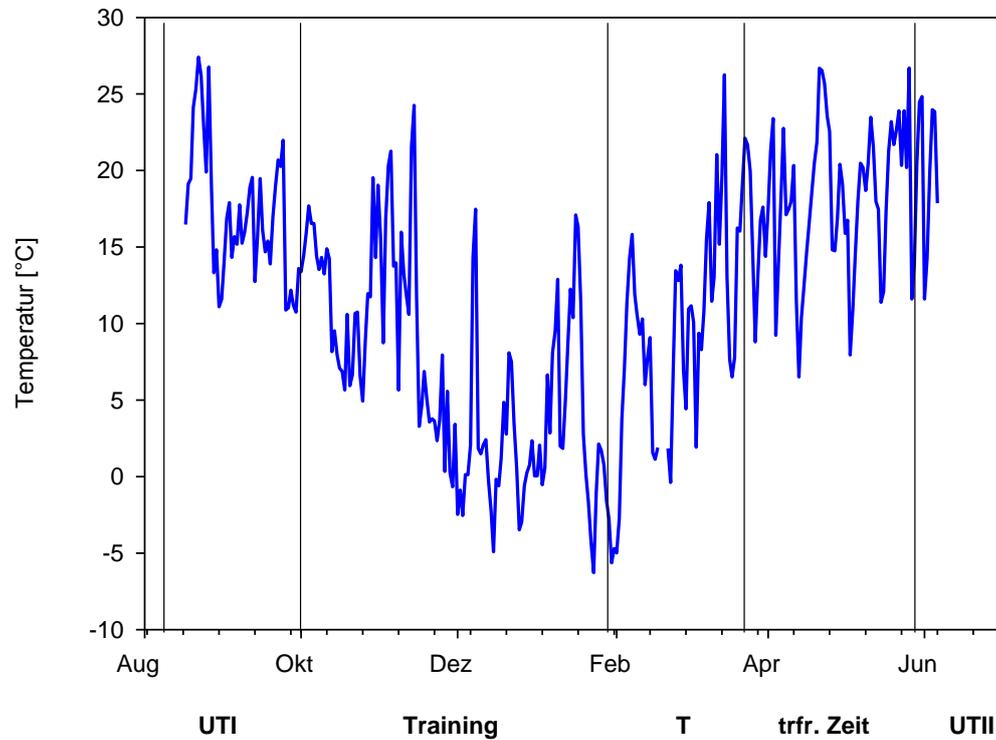


Abbildung 46: Temperaturkurve (Außentemperatur) über den gesamten Versuchszeitraum; Die senkrechten Linien kennzeichnen die verschiedenen Versuchsphasen (UTI: Messphase untrainiert I, T: Messphase trainiert, trfr. Zeit: trainingsfreie Zeit, UTII: Messphase untrainiert II).

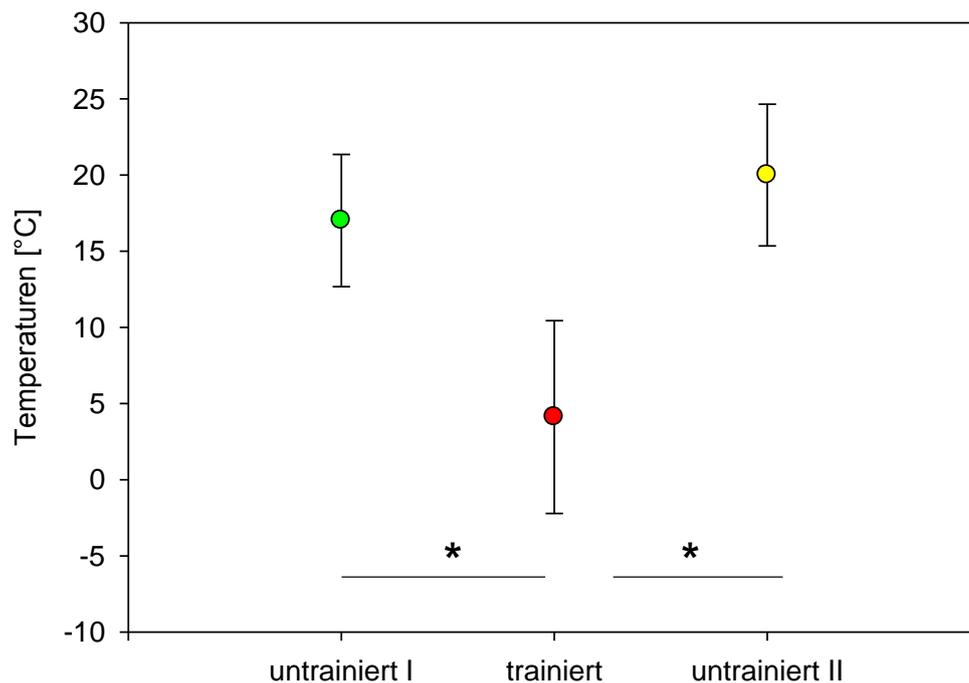


Abbildung 47: Durchschnittstemperaturen (Außentemperaturen) [MW±s] während den einzelnen Messphasen; untrainiert I (●), trainiert (●) und untrainiert II (●).

Der Temperaturunterschied zwischen den Messphasen „untrainiert I“ und „trainiert“ ($p < 0,001$, rm ANOVA on Ranks) und zwischen den Messphasen „trainiert“ und „untrainiert II“ ($p < 0,001$, rm ANOVA on Ranks) war statistisch signifikant. Die Temperaturen während den Messphasen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ unterschieden sich dagegen statistisch nicht (Abbildung 47).

7. Aktivitätsmessungen

7.1. Aktivitäten an den unterschiedlichen Wochentagen

Eine rm ANOVA der Wochentag-Aktivitäten ergab, dass sich die Tagesmittelwerte der jeweiligen Wochentage teilweise statistisch signifikant voneinander unterschieden. So wurde deutlich, dass an den Samstagen die Aktivität der Hunde im Vergleich zu den restlichen Wochentagen signifikant zurückging. Die Werkstage (Montag bis Freitag) unterschieden sich nicht hinsichtlich der Aktivität der Hunde. Die Sonntage zeigten zwar eine Tendenz zu niedrigeren Werten, der Unterschied war allerdings nur im

Vergleich zu den Montagen signifikant. Auch zwischen Samstag und Sonntag konnte kein signifikanter Unterschied beobachtet werden (Tabelle 12 und Abbildung 48).

Tabelle 12: Mittelwerte und Signifikanzniveau aus dem Vergleich der einzelnen Wochentage.

| | Mittelwert | p (vs. Samstag) | p (vs. Sonntag) |
|-------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Montag | 1052,976 | $\leq 0,001$ | $= 0,006$ |
| Dienstag | 1052,470 | $= 0,006$ | $\geq 0,050$ |
| Mittwoch | 1006,489 | $= 0,002$ | $\geq 0,050$ |
| Donnerstag | 996,458 | $= 0,016$ | $\geq 0,050$ |
| Freitag | 1011,952 | $= 0,006$ | $\geq 0,050$ |
| Samstag | 848,849 | | $\geq 0,050$ |
| Sonntag | 892,113 | $\geq 0,050$ | |

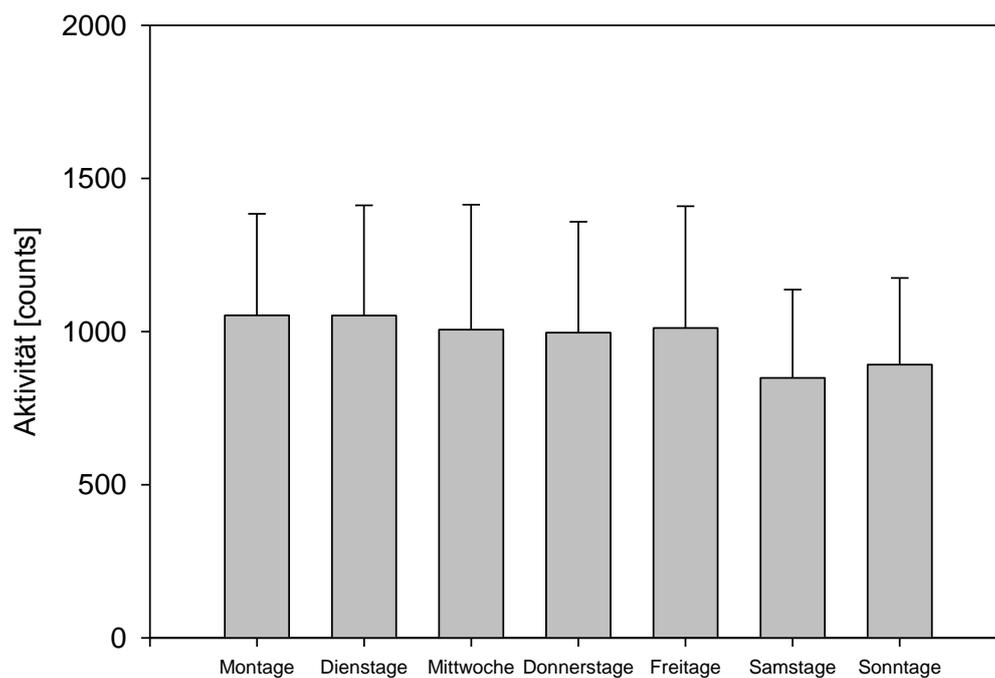


Abbildung 48: Aktivität der Hunde an den jeweiligen Wochentagen (Tagesmittelwert über den gesamten Versuchszeitraum) mit Standardabweichungen.

Fasst man die 5 Werkstage bzw. Samstag und Sonntag zu jeweils einer Gruppe zusammen, so ergibt sich auch hier ein statistisch signifikanter Unterschied

($F_{1,271} = 22,683$, $p < 0,001$, rm ANOVA) mit geringerer freier Aktivität an den Wochenenden.

7.2. Aktivitäten in den unterschiedlichen Versuchsphasen

Bei der statistischen Auswertung der freien Aktivität in den unterschiedlichen Versuchsphasen wurden signifikante Unterschiede deutlich. Während der trainingsfreien Zeit waren die Hunde weniger aktiv als während des Trainings ($F_{1,195} = 5,037$, $p = 0,027$, rm ANOVA) bzw. während der Messphase „trainiert“ ($F_{1,111} = 12,153$, $p = 0,002$, rm ANOVA). Keine Unterschiede zeigten sich dagegen zwischen der Messphase „untrainiert I“ und sämtlichen anderen Versuchsphasen (Abbildung 49).

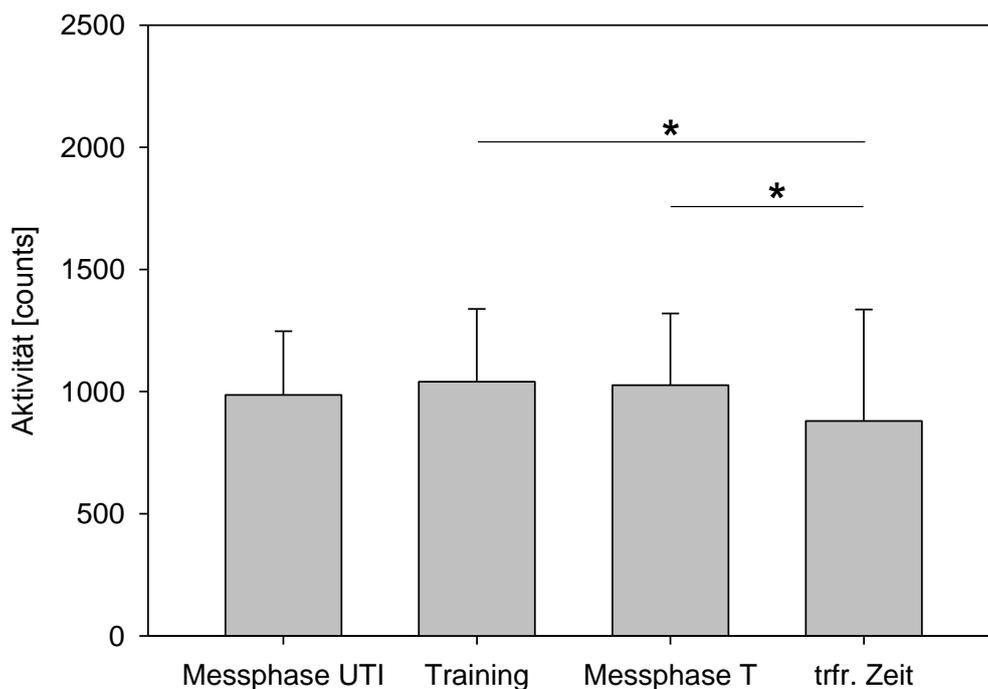


Abbildung 49: Mittelwerte der Aktivitäten der Hunde in den jeweiligen Versuchsphasen (Messphase „untrainiert I“: UTI; Messphase „trainiert“: T; trainingsfreie Zeit: trfr. Zeit) mit Standardabweichungen.

Da die Wochentage, wie oben gezeigt, teilweise signifikanten Einfluss auf die freie Aktivität der Tiere haben, wurde zusätzlich eine Auswertung der reinen Wochenendaktivitäten in den unterschiedlichen Versuchsphasen durchgeführt. In diesem Fall wurden die Wochenenden ausgewählt, da hierdurch die freie Aktivität der Hunde wohl unverfälschter dargestellt werden kann, da die Tiere weniger durch

Personenverkehr, Bau- oder Reinigungsarbeiten oder Umweltgeräusche gestört werden. Bei dieser Auswertung wurde ein signifikanter Unterschied zwischen der Messphase „untrainiert I“ und der Trainingsphase ($F_{1,45} = 5,154$, $p = 0,041$, rm ANOVA) beobachtet. Die Aktivität der Hunde war während der Messphase „untrainiert I“ geringer als während des Trainings (Abbildung 50).

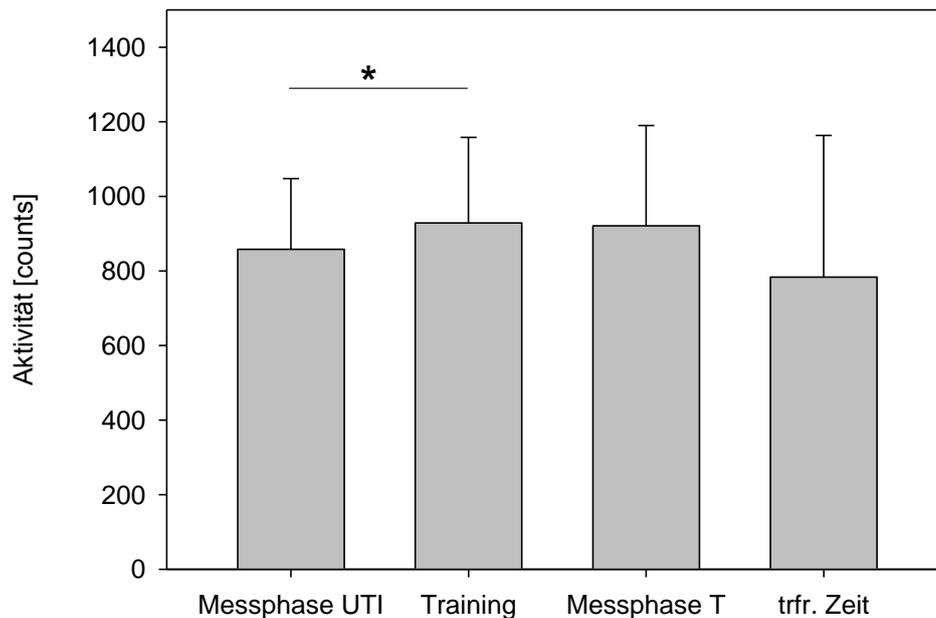


Abbildung 50: Mittelwerte der Wochenendaktivitäten der Hunde in den jeweiligen Versuchsphasen (Messphase „untrainiert I“: UTI; Messphase „trainiert“: T; trainingsfreie Zeit: trfr. Zeit) mit Standardabweichungen.

7.3. Aktivität und Außentemperatur

Um den Einfluss der Umgebungstemperatur auf die freie Aktivität der Hunde zu untersuchen, wurden die oben erwähnten Temperaturcluster verwendet. Die freie Aktivität der Hunde zeigte eine klare Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Die Aktivitäten der einzelnen Temperaturcluster unterschieden sich signifikant voneinander. So war die Durchschnittstagesaktivität der Hunde im Cluster A (-10°C bis $+5^{\circ}\text{C}$) signifikant höher als die im Cluster B ($+5^{\circ}\text{C}$ bis $+20^{\circ}\text{C}$) ($F_{1,237} = 8,071$, $p = 0,006$, rm ANOVA) und C ($+20^{\circ}\text{C}$ bis $+30^{\circ}\text{C}$) ($F_{1,105} = 38,564$, $p < 0,001$, rm ANOVA). Auch die Aktivitäten der Cluster B und C unterschieden sich signifikant ($F_{1,199} = 18,209$,

$p < 0,001$, rm ANOVA) (Abbildung 51). Somit sank die freie Aktivität mit steigender Umgebungstemperatur.

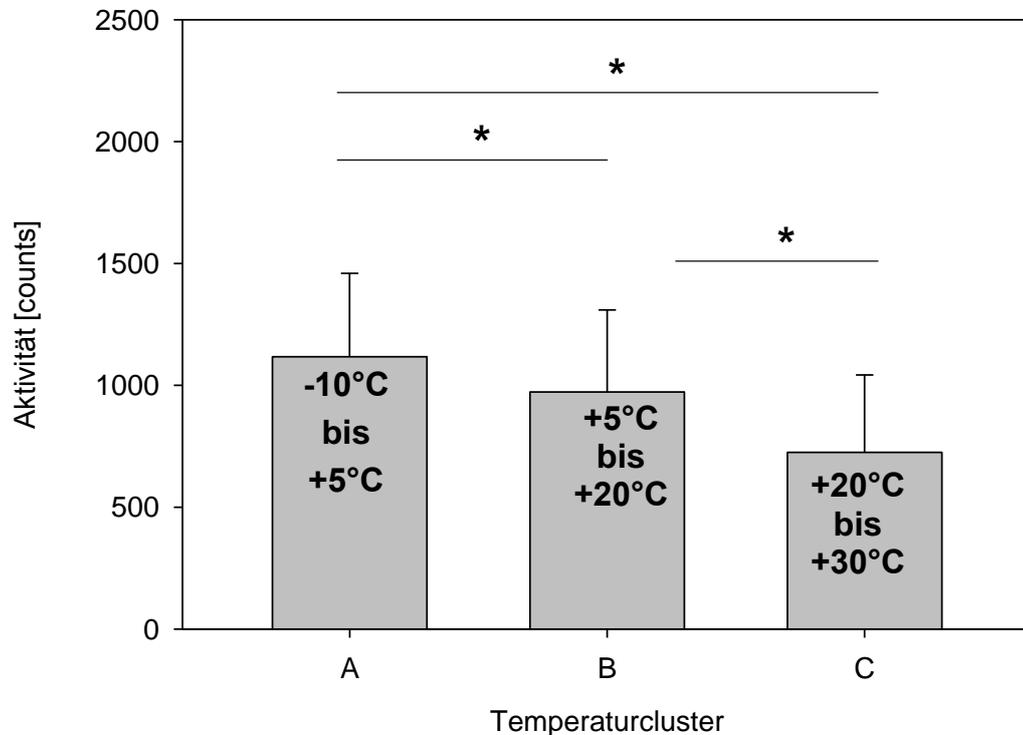


Abbildung 51: Freien Aktivität der Hunde [MW \pm s] in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.

8. Körpergewichte

8.1. BCS

Da es sich beim Body Condition Score um ein Scoringssystem und nicht um normalverteilte Messwerte handelt, wurde die statistische Analyse mit Hilfe einer rm ANOVA on ranks durchgeführt. Training bewirkte in dieser Studie keine statistisch signifikanten Veränderungen des BCS (Abbildung 52).

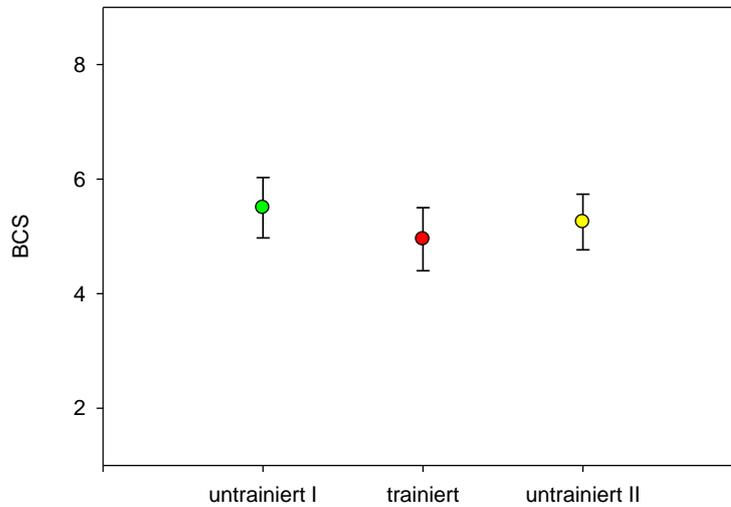


Abbildung 52: Body condition score (BCS) von zehn Hunden [MW±s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

8.2. Körpergewicht

Betrachtet man das absolute Körpergewicht, so wird eine statistisch signifikante Gewichtszunahme der „untrainiert II“-Tiere deutlich, jeweils im Vergleich zum Zustand „untrainiert I“ ($F_{1,19} = 15,151$, $p = 0,004$, rm ANOVA) und „trainiert“ ($F_{1,19} = 16,000$, $p = 0,003$, rm ANOVA) (Abbildung 53 und Abbildung 54).

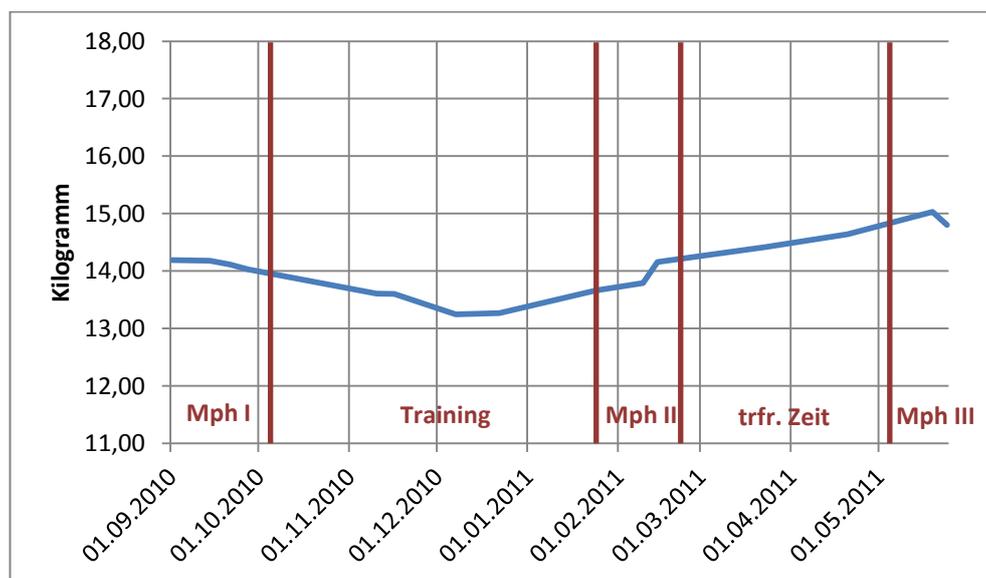


Abbildung 53: durchschnittliches Gewicht der Hunde im Versuchsverlauf.

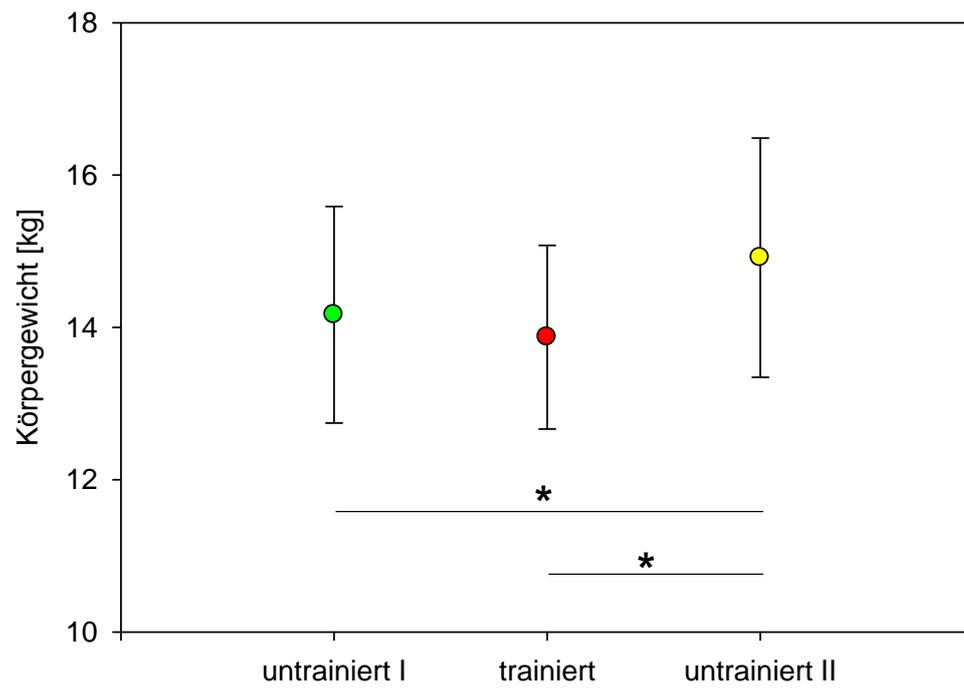


Abbildung 54: Körpergewicht von zehn Hunden [MW \pm s] im Zustand „untrainiert I“ (●), „trainiert“ (●) und „untrainiert II“ (●).

VI. Diskussion

1. Kritik der Methodik

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Folgestudie, was bedeutet, dass die verwendeten Methoden erprobt waren und sich bereits bewährt hatten. Nichtsdestotrotz wurden einige Änderungen vorgenommen. So wurden Hunde einer kleineren Rasse (Beagle) als Versuchstiere verwendet und besonderer Wert auf ein langfristiges Ausdauertraining im aeroben Leistungsbereich der Hunde gelegt. Ob eine ausreichende Trainingsintensität gewählt wurde, um trainingsinduzierte Veränderungen der Herzfrequenz bzw. eine Zunahme der Muskeldicken beobachten zu können, konnte aufgrund fehlender Vergleichsstudien und Literaturdaten nicht mit Sicherheit gesagt werden.

1.1. Herzfrequenzmessung

Die Herzfrequenz stellt einen sehr sensiblen Indikator für alle Arten von physischem oder psychischem Stress dar (Mai, 2006; Vincent and Leahy, 1997), was sie zu einem sehr interessanten Parameter für die Trainingslehre macht, aber auch gleichzeitig ihre Interpretation erschwert. Nicht immer kann klar abgegrenzt werden, inwieweit eine Herzfrequenzerhöhung durch die körperliche Anstrengung oder durch eine mentale Aufregung der Tiere zustande kommt. Allerdings wurde durch die lange Gewöhnungszeit und das Durchführen der Messungen in der gewohnten Umgebung und zu den ungefähr gleichen Tageszeiten, größte Sorgfalt auf eine durch äußere Einflüsse möglichst unbeeinflusste Messung verwendet.

Die Herzfrequenzmessung mit Hilfe des aus dem Humansportbereich bekannten Polarbrustgurtes stellte sich, wie auch schon in den beiden vorausgegangenen Studien der Arbeitsgruppe (Gerth, 2010; Ruoss, 2011), als unkompliziert und effektiv heraus. Durch das Aufbringen eines leitungsverbessernden Gels auf die Brustwand der Tiere konnte der Kontakt optimiert werden und die Hunde wurden in ihrer Bewegungsfreiheit nicht eingeschränkt. Nichtsdestotrotz kam es hin und wieder zu Kontaktverlusten – vor allem bei der Laufbandarbeit – und damit zu Messungenauigkeiten.

Eine weitere Methode zur Messung von Herzfrequenzen, die in der vorliegenden Arbeit Anwendung fand, ist das Elektrokardiogramm. Dieses stellt in der Tiermedizin eine nicht mehr wegzudenkende Methode für kardiologische Diagnostik und wissenschaftliche Untersuchungen dar (Hanton et al., 2001; Hanton and

Rabemampianina, 2006). Viele morphologische und funktionelle Veränderungen, ob physiologisch oder pathologisch, hinterlassen deutliche Spuren auf einem EKG. In der vorliegenden Studie wurde das EKG lediglich zur Erfassung der (mittleren, maximalen und minimalen) Herzfrequenzen in Ruhe und unter Belastung verwendet. Hierfür wurde auf das EKG – und nicht auf die Herzfrequenzmessung mittels Polargurt – zurückgegriffen, da es hiermit leichter war eventuelle Verfälschungen der Frequenz, beispielsweise durch äußere Einflussfaktoren (Lärm, hereinkommende Personen etc.), heraus zu filtern. Hinzu kam, dass die EKG-Messungen ohne Respirometriemaske durchgeführt wurden, was die Kooperationsbereitschaft der Hunde erhöhte und die Tiere deutlich weniger aufregte als bei der Polargurtmessung. Während den Messungen stellte sich heraus, dass die Tiere die EKG-Elektroden sowohl während des seitlichen Liegens für die Ruhemessungen, als auch während des Laufens problemlos akzeptierten.

Die Unterschiede zwischen den per EKG und den mit Hilfe des Polargurtes gemessenen Herzfrequenzen machen die leichte Beeinflussung des Pulses durch sämtliche äußeren Einflüsse deutlich und zeigen auch die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten der Herzfrequenzmessung als zuverlässige Parameter für den Energieverbrauch von Hunden.

1.2. Respirometrie

Die Respirometrie oder auch indirekte Kalorimetrie ist eine validierte Methode zur Erfassung des Energieverbrauches von Individuen und wurde mittlerweile auch beim Hund schon vielfach angewendet (Gerth, 2010; NRC, 2006a; Ruoss, 2011; Schoeller and Webb, 1984; Speakman et al., 2001). In den meisten Studien (vor allem am Menschen) wird die maximale Sauerstoffaufnahme gemessen. Diese ist erreicht, wenn die Sauerstoffaufnahme ihr Maximum erreicht hat und aufgrund der Einschränkungen der Zirkulation und des respiratorischen Systems konstant bleibt (Hill, 1926). Ab diesem Zeitpunkt wird der zusätzliche Energiebedarf über anaerobe Stoffwechselwege gedeckt, was zu einer Anhäufung von Laktat im Körper führt (NRC, 2006b). Sichtbar machen kann man die maximale Sauerstoffaufnahme anhand eines Graphen. Der Punkt, an dem die Kurve der Sauerstoffaufnahme keine weitere Steigung mehr zeigt, wird als ihr Maximum definiert. Wird dieser Punkt überschritten, so kommt es in der Regel entweder zu keiner weiteren Steigerung (sichtbar als Plateau) oder die Aufnahme geht sogar leicht zurück (Mitchell et al., 1958). Es stellte sich jedoch in der vorliegenden

Studie als schwierig bis unmöglich heraus, die Tiere an ihr Leistungsmaximum zu bringen bzw. dieses als solches zu erkennen. Deshalb wurde in der vorliegenden Studie nicht mit dem maximalen Sauerstoffverbrauch sondern mit dem Sauerstoffverbrauch unter submaximaler Belastung, oder „performance $\dot{V}O_2$ “, (Joyner and Coyle, 2008) gearbeitet.

Bailie et al. (1961) konnten in ihrer Studie bereits zeigen, dass Tiere ohne Respirometriemaske leistungsbereiter waren, als während den respirometrischen Messungen mittels Maske. Die Hunde in der vorliegenden Studie wurden über einen Zeitraum von 15 Wochen Schritt für Schritt an die Respirometriemaske gewöhnt, dennoch war es den meisten, vor allem bei den Laufbandeinheiten, unangenehm sie zu tragen und einige verweigerten das Laufen mit Maske sogar komplett (was die Erklärung für die geringere Probandenanzahl bei den Schwellentests darstellt). Das Tragen der Maske beunruhigte die Tiere teilweise merklich und beeinflusst somit auch den Sauerstoffbedarf und die Herzfrequenz während den Messungen. Somit können evtl. Messwertverfälschungen durch emotionalen Stress nicht ausgeschlossen werden.

1.3. Echokardiographie

Der Herzultraschall ist mittlerweile eine etablierte Methode zur Erfassung funktioneller und morphologischer, physiologischer und pathologischer Veränderungen des Herzens und ist auch aus der Veterinärkardiologie nicht mehr wegzudenken (Boon et al., 1983; Lang et al., 2006). In der vorliegenden Studie wurden die Messungen unter Feldbedingungen und – um die Vergleichbarkeit mit vorausgegangenen Studien (Gerth, 2010; Ruoss, 2011) zu gewährleisten – am stehenden Tier vorgenommen. Diese Tatsache erschwerte eine exakte Datenerhebung durch unruhige Tiere teilweise erheblich. Zwar wurde natürlich auf möglichst konstante Messbedingungen geachtet (um untersucher-bedingte Schwankungen so gering wie möglich zu halten, wurden die Messungen immer von der gleichen Person durchgeführt), doch können Ergebnisverfälschungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Trotz aller Bemühungen um exakte und gleichbleibende Messbedingungen, stellte sich sowohl während der Messungen als auch bei der Auswertung der Ergebnisse heraus, dass diese Methode, bedingt durch unterschiedliche Sondenpositionen, der kleinen Stichprobengröße und gerätebedingte Messungenauigkeiten, nur relativ unpräzise Daten liefert. Für die Auswertung der Herzultraschalldaten kam außerdem erschwerend hinzu, dass es durch Training und Gewichtszunahme zu einer Veränderung der Herzposition innerhalb des

Thorax kommen kann. Somit konnte auch bei möglichst exakter Sondenposition nicht gewährleistet werden, dass für die M-Mode-Messungen immer genau die gleiche Ebene getroffen wurde. Die relativ geringen Standardabweichungen rechtfertigen aber dennoch eine Auswertung und Verwendung der M-Mode-Daten in dieser Studie.

1.4. Muskelultraschall

Um die Dicke ausgewählter Lokomotionsmuskeln zu ermitteln, wurden diese geschallt und anschließend am PC vermessen. Diese Methode wurde bereits in zwei weiteren Studien der Arbeitsgruppe Starck verwendet (Gerth, 2010; Ruoss, 2011). Auch bei der Schlachttieruntersuchung und bei der Bestandsbetreuung von Milchkuhbeständen wird der Muskelultraschall routinemäßig verwendet, um die Rückenfettdicke und die Kotelettmuskeldicke zu messen und mit deren Hilfe den Schlachtwert eines Tieres zu bestimmen (Gernand and Lenz, 2005; Schneider et al., 2005). Die Messungen wurden unter Feldbedingungen und, um untersucher-bedingte Varianzen so gering wie möglich zu halten, von immer derselben Person durchgeführt. Trotz großer Bemühungen, die Messungen so genau und unter so konstanten Bedingungen wie möglich durchzuführen, stellte es sich als sehr schwierig heraus, einen immer gleichen Sondendruck auf der Muskulatur zu gewährleisten. Da aber bereits kleinste Druckveränderungen seitens des Untersuchers zu relativ großen Dickenunterschieden führen können, sind Messfehler als Erklärung der teils unerwarteten Ergebnisse nicht auszuschließen.

Auch die zum Teil erheblichen Körpermassenveränderungen der Tiere zwischen den einzelnen Messphasen erschwerten die Interpretation der Ultraschallbilder, da eine klare Trennung zwischen Fett- und Muskelgewebe nicht immer möglich war. Im Versuchsverlauf verloren die Hunde während des Trainings (zwar nicht signifikant, aber merklich) an Körpergewicht und nahmen in der trainingsfreien Zeit wieder signifikant zu. Diese Veränderungen kamen durch leider nicht erfolgte Anpassungen (bedingt durch parallel durchgeführte Fütterungsversuche) der Futtermengen an die vermehrte bzw. verringerte Bewegung zu Stande.

1.5. Aktivitätsmessungen

Für die Erfassung physischer Aktivität werden grundsätzlich drei Herangehensweisen unterschieden (Westerterp, 2008):

- Basierend auf der Erfassung des $\dot{V}O_2$: Doubly labelled water, Kalorimetrie; relativ teuer, begrenzte Einsatzmöglichkeiten, aber genau.
- Basierend auf der Erfassung der HF: billig, nicht invasiv, einfach; aber die HF wird noch von vielen anderen Faktoren außer der freien Aktivität beeinflusst (Aufregung, Stress, Temperaturen, Verdauung etc.).
- Basierend auf der Erfassung der Körperbeschleunigung: nicht invasiv, relativ kostengünstig, einfach, ermöglichen ethologische Untersuchungen anhand der Rohdaten.

Die Messung der freien Aktivität mit Hilfe dreidimensionaler Beschleunigungssensoren ist eine mittlerweile bewährte und mehrfach validierte Methode (Dow et al., 2009; Halsey et al., 2009). Im Vergleich der Möglichkeiten, physische Aktivität zu erfassen, ist die Verwendung von Beschleunigungssensoren wohl die einfachste, objektivste und vielversprechendste Methode (Westerterp, 2008). In zwei vorangegangenen Studien der Arbeitsgruppe (Gerth, 2010; Ruoss, 2011) wurde bereits mit der Erfassung physischer Aktivität mittels Beschleunigungssensoren gearbeitet und gute Ergebnisse damit erzielt, was eine weitere Verwendung dieser Methode in der vorliegenden Studie rechtfertigt.

2. Korrelation von Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch

Es konnte bereits in mehreren Studien, unter anderem auch beim Hund (Butler et al., 1992; Ruoss, 2011; Speakman et al., 2001), eine lineare Beziehung zwischen der Herzfrequenz und dem Sauerstoffverbrauch nachgewiesen werden. Daher stellt die Messung der Herzfrequenz eine einfache, kostengünstige, nicht-invasive und somit zukunftssträchtige Methode zur Abschätzung des Sauerstoffverbrauchs und damit des Energiebedarfs dar. Auch in der vorliegenden Studie konnte in allen drei Trainingszuständen und mit den Mittelwerten der drei Messphasen eine enge Korrelation der beiden Parameter gezeigt werden. In der Regressionsgleichung für die Werte aller drei Messphasen war R^2 gleich 0,802. Es bleibt somit eine Restvarianz von ca. 20%. Diese Werte stimmen mit den Ergebnissen einer vorhergehenden Studie überein (Ruoss, 2011), bei der R^2 0,769 betrug und die Gleichung wie folgt lautete: $y = 0,320x - 19,299$.

Für die Anwendung der Beziehung von Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme in Forschung und Praxis zur Feststellung des Energiebedarfs stellt sich die Frage, inwieweit die Daten von einer Hunderasse auf die andere übertragen werden können.

Bei Anwendung der Gleichung von Ruoss (2011) auf die eigenen Daten kommt es zu einer systematischen Unterschätzung des Sauerstoffverbauchs, vor allem bei höheren Geschwindigkeiten. Bei Verwendung der eigenen Gleichungen für die FBIs kam es dann zu einer entsprechenden Überschätzung. Nach Schmidt-Nielsen (1984) nimmt der Energiebedarf für die Fortbewegung nicht linear mit der Körpermasse zu. Auch im Herzkreislaufsystem sind allometrische Effekte bekannt. Daher wurden die Daten der vorliegenden Studie zur Sauerstoffaufnahme und die entsprechenden Daten von Ruoss (2011) auf die metabolische Körpermasse bezogen. Anschließend wurde für beide Studien eine lineare Regression zwischen Herzschlag (x ; Schläge/min) und Sauerstoffaufnahme pro kg metabolischer Körpermasse (y ; ml/kg $KM^{0,75}$ /min) errechnet. Die resultierenden Gleichungen waren nahezu identisch: FBI: $y = 0,65x - 35,53$; $R^2=0,79$; Beagles: $y = 0,65x - 34,26$; $R^2=0,71$). Für die Anwendung bei anderen Hunderassen in vergleichbaren Größenklassen zwischen 10 und 40 kg kann daher mit einer aus den Daten beider Dissertationen errechneten Gleichung gearbeitet werden: $y = 0,65x - 34,91$; $R^2=0,75$

Vergleicht man die Geradengleichungen beider Studien mit Hilfe einer Kovarianzanalyse (ANCOVA) in Steigung und Lage, können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Der Anstieg des Energieverbrauchs bei Steigerung der Intensität der Bewegung (entspricht der Steigung der Geraden) scheint also nicht von der Größe der Hunde abzuhängen. Somit wurde die Korrelation von Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch auch bei Hunden kleinerer Rassen bestätigt.

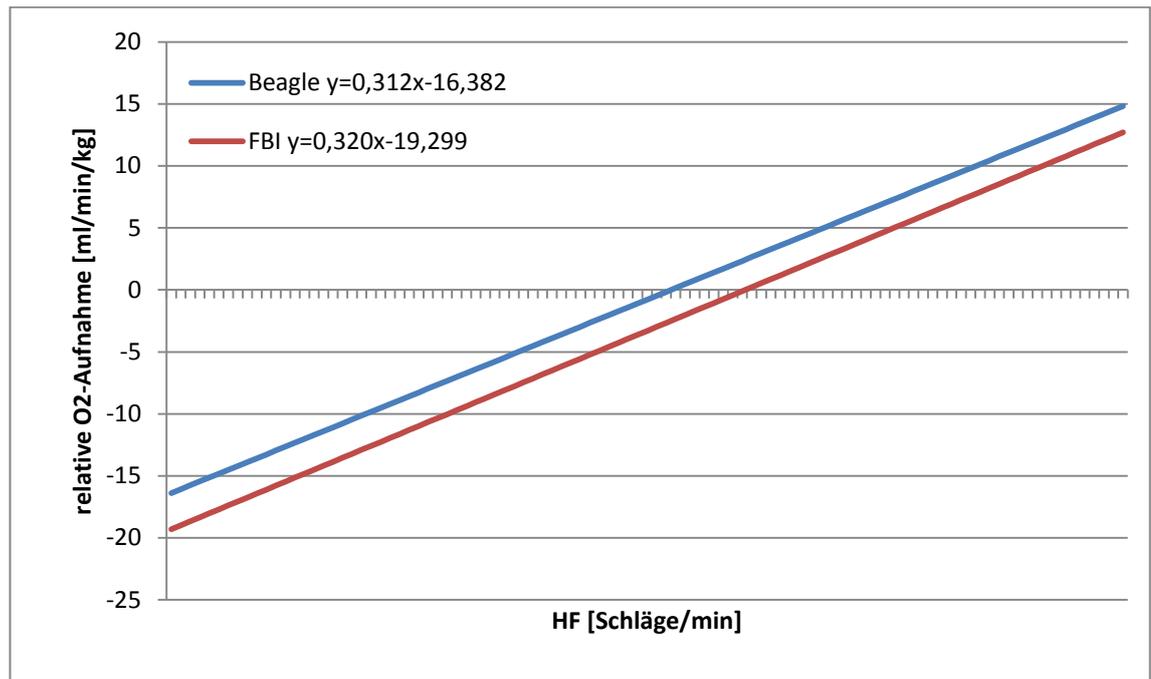


Abbildung 55: Regressionsgeraden der Korrelation von Herzfrequenz (HF) und relativen Sauerstoffverbrauch bei Beagle und FBI-Hunden.

Doch die Herzfrequenzmethode zur Abschätzung des Energieverbrauchs hat auch ihre Grenzen. Beispielsweise wird die Abschätzung des Energieverbrauchs mittels Herzfrequenzmessung relativ ungenau, falls die betroffenen Individuen eine nur geringe Aktivität und damit eine durchschnittliche 24-Stunden-Herzfrequenz nur knapp über dem Ruhepuls zeigen. Somit ist eine Anwendung dieser Methode in Ruhe nicht ausreichend genau, da in diesem Fall nur eine geringe Korrelation zwischen Sauerstoffverbrauch und Herzfrequenz besteht. Ähnlich sieht es bei eher statischen (sitzenden) Tätigkeiten beim Menschen aus. Auch hier wird der tatsächliche Energieverbrauch durch die Herzfrequenzmethode eher unterschätzt (Christensen et al., 1983). Grundsätzlich wäre es also, um eine möglichst exakte Energieabschätzung zu ermöglichen, nötig, für einzelne Hunderassen (oder zumindest für Gruppen kleiner, mittelgroßer und großer Rassen) und jede Art von Aktivität (oder zumindest für Gruppen gleichförmiger Aktivitäten wie zum Beispiel Ausdauertraining oder Sprints) eigene Regressionsgleichungen zu erstellen.

Weitere Limitationen der Herzfrequenzmethode zeigte eine Studie von Coenen an Trabern (2010). So kommt es nach dem Einsetzen physischer Arbeit vorübergehend zu einer Sauerstoffschuld, das heißt das Tier verbraucht erst einmal mehr Sauerstoff als es aufnehmen kann, solange bis die Sauerstoffaufnahme angekurbelt wurde (NRC, 2006b).

Die Herzfrequenz zeigt aber eine geringere Verzögerung. Bei dieser zeitlichen Verschiebung handelt es sich allerdings um Sekunden, die Ungenauigkeit ist also gering. Hinzu kommt, dass der Energieverbrauch nach körperlicher Arbeit noch erhöht bleibt (so genannter EPOC) während die Herzfrequenz wieder sehr schnell ihre Ausgangswerte erreicht. Außerdem wird bei der Verwendung der Herzfrequenz-Sauerstoffaufnahme-Korrelation zur Energieabschätzung jegliche nichtoxidative Bereitstellung von Energie nicht berücksichtigt. Nicht vergessen werden dürfen außerdem die mannigfaltigen anderen Faktoren, durch die die Herzfrequenz beeinflusst wird (wie zum Beispiel Geschlecht, Alter, Trainingsstatus, Aufregung, Stress). Sämtliche äußeren Einflussfaktoren auf die Herzfrequenz können die verbleibenden 20% Varianz bei der Regressionsgleichung erklären.

Die Limitationen der Methode machen ihren Kompromisscharakter deutlich. Sie ist zwar sehr einfach und kostengünstig anzuwenden, aber die Herzfrequenzen ermöglichen eben nur eine Abschätzung des Energieverbrauches und keine Angabe exakter Werte. Green (2011) unterscheidet zwei verschiedene Herangehensweisen an diese Methode:

- Die quantitative Herangehensweise: Es werden zunächst gleichzeitig die Herzfrequenz und der Sauerstoffverbrauch gemessen. Mit diesen Werten wird eine Regressionsgleichung aufgestellt (Kalibration), mit deren Hilfe dann in einem zweiten Schritt (bei alleiniger Herzfrequenzmessung) die Sauerstoffaufnahme und daraus der Energieverbrauch geschätzt werden kann. Diese Anwendungsart der Herzfrequenzmethode ist vor allem im Haustierbereich durchaus denkbar und auch relativ genau, indem für einzelne Rassen individuelle Regressionsgleichungen aufgestellt werden.
- Die qualitative Herangehensweise: Die oben erwähnte Kalibration wird übersprungen und der Sauerstoffverbrauch direkt abgeschätzt (anwendbar zum Beispiel bei Wildtieren, bei denen oftmals eine vorangehende Respirometrie nicht möglich ist oder nur unter sehr großem Aufwand durchgeführt werden könnte).

Die Verwendung eines rasse- bzw. populationsspezifischen Koeffizienten kann einen Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit und somit zwischen quantitativer und qualitativer Herangehensweise darstellen. Die vorliegende Studie konnte mit der Erstellung einer Korrelation von Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch bei Hunden einer kleinen bis mittelgroßen Rasse einen Beitrag für die weitere Etablierung und

Verbesserung dieser Methode zur Energieabschätzung liefern. Die bisherige Abschätzung des Energiebedarfs von Arbeits- oder Sporthunden wurde in der Regel unter Laborbedingungen mittels indirekter Kalorimetrie auf dem Laufband ermittelt und näherungsweise für andere Belastungen und Rassen verwendet (NRC, 2006b). Die Messung der Herzfrequenzen zur Abschätzung des Energieverbrauchs kann problemlos während unterschiedlicher Aktivitäten und unter Feldbedingungen stattfinden, was eine genauere Bestimmung des Energiebedarfs ermöglichen und somit oben genannte Näherungswerte ablösen könnte. Insbesondere im Vergleich mit der doubly labelled water-Methode, die zwar sehr genau ist, aber eine mehrmalige Blutentnahme erfordert und keine Rückschlüsse auf den Energiebedarf einzelner Tätigkeiten zulässt, stellt die Herzfrequenzmessung somit eine hinreichend genaue und mit akzeptablem Aufwand verbundene Methode dar. Auch die Energieabschätzung mittels direkter oder indirekter Respirometrie ist im Vergleich deutlich aufwendiger, invasiver und teurer und somit keine wirkliche Alternative zur Herzfrequenzmethode.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Messung der Herzfrequenzen durchaus eine hinreichend genaue (bei Vorhandensein möglichst individueller Regressionsgleichungen), nicht-invasive, einfach anzuwendende und kostengünstige Methode darstellt um eine Abschätzung des Energieverbrauches einzelner Individuen zu ermöglichen. Mit der Erstellung möglichst vieler unterschiedlicher Regressionsgleichungen, beispielsweise für unterschiedliche Leistungen und verschiedene Hunderassen, kann diese Methode deutlich an Genauigkeit hinzugewinnen. Somit sind weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet und das Erstellen möglichst vieler verschiedener Regressionsgleichungen nötig.

3. Effekte von Ausdauertraining

3.1. Effekte des Trainings auf den Energiestoffwechsel

Die Respirometrie wurde in Ruhe und unter Belastung durchgeführt, um Sauerstoffverbrauch und Kohlenstoffdioxidproduktion als Parameter für den Energiebedarf zu messen. Zusätzlich wurden die Atemfrequenz, das Expirationsvolumen und das Atemminutenvolumen erfasst.

3.1.1. Effekte des Trainings auf die Sauerstoffaufnahme und die Kohlendioxidabgabe

Da das Körpergewicht der Hunde vor allem während der trainingsfreien Phase teilweise erheblich schwankte, ist es am sinnvollsten für die Auswertung der Sauerstoffaufnahme bzw. der Kohlendioxidproduktion die relativen, also die durch das Körpergewicht bereinigten Werte, heranzuziehen.

In Ruhe waren sowohl bei der Sauerstoffaufnahme als auch bei der Kohlendioxidabgabe deutliche Trainingseffekte zu beobachten, da beide durch das Training signifikant anstiegen. Es kam also, im Gegensatz zur Studie von Ruoss (2011) an FBI-Hunden, zu einem trainingsinduzierten Anstieg der RMR. Diese Tatsache ist ein klarer Hinweis darauf, dass die Verlängerung der Trainingsdauer in der vorliegenden Studie im Vergleich zur Arbeit von Ruoss offenbar eine Veränderung des Ruhestoffwechsels bewirken konnte. Der trainingsinduzierte Anstieg der RMR deckt sich mit den Beobachtungen vieler anderer Studien zu diesem Thema, in denen es durch Ausdauertraining in der Regel zu einem Anstieg der Sauerstoffaufnahme und damit zu einer Leistungssteigerung der respiratorischen Kaskade kam (Ballor, 1991b; Ballor and Poehlman, 1995; Wilterdink et al., 1992). Scheuer und Tipton (1977) schrieben ca. 50% dieses Anstiegs einem erhöhten Schlagvolumen zu. Ein weiterer Mechanismus, der dazu beiträgt, ist die Optimierung der Sauerstoffverwertung auf muskulärer Ebene (Hawley, 2002). Zu ähnlichen Ergebnissen gelangt eine Studie an Foxhounds, die ebenfalls eine Erhöhung der Sauerstoffaufnahme verzeichnen konnte (Musch et al., 1985). Die Autoren machten vor allem das gesteigerte Schlagvolumen und weniger die peripheren Anpassungsvorgänge für diese Erhöhung verantwortlich. Auch Blomqvist (1983) bekräftigte diese Annahme und schrieb einer verbesserten Utilisation des Sauerstoffs im Gewebe nur einen sehr kleinen Teil der gesteigerten Sauerstoffaufnahme zu. Vielmehr ging er von einer verbesserten Pumpfunktion des Herzens (wiederum in Verbindung mit einem erhöhten Schlagvolumen) aus. Die fehlende Steigerung des Schlagvolumens bei gleichzeitig erhöhter Sauerstoffaufnahme in der vorliegenden Studie stellt hingegen ein klares Indiz für die große Bedeutung der Verbesserung peripherer Sauerstoffutilisation dar. Allerdings konnte auch anhand der Verkürzungsfraktion eine verbesserte Pumpfunktion des Herzens nachgewiesen werden, was wiederum im Einklang zu den oben erwähnten Theorien steht. Einige Studien gehen davon aus, dass eine Erhöhung der RMR vor allem in einer Zunahme der FFM begründet ist (Schulz and Schoeller, 1994; Speakman and Selman, 2003). Die Hunde

verloren zwar durch das Training nicht signifikant an Gewicht, jedoch änderte sich der (relativ subjektive) BCS, wenn auch nicht signifikant. Diese Tatsache gibt Hinweise darauf, dass sich der Körperbau der Tiere verändert haben könnte, d.h. es könnte zu einer Umverteilung des Gewichts gekommen sein. Die Tiere sind „athletischer“ geworden und haben deshalb unter Umständen mehr metabolisch aktive Körpermasse (FFM) im trainierten Zustand aufzuweisen. Dem widersprechen allerdings die fehlenden Veränderungen bei der Muskeldickemessung (siehe Kapitel VI.5.). Bei diesen Überlegungen muss jedoch berücksichtigt werden, dass nur eine kleine Auswahl von Muskelgruppen vermessen wurde. Trotz der ausbleibenden Veränderungen an diesen Muskeln, könnte relativ mehr Muskelmasse nach dem Training existieren. Dies hätte durch eine Analyse der Körpermassenzusammensetzung (beispielsweise mithilfe einer Ganzkörper-dual-energy-x-ray-Messung) überprüft werden können. Auf diese Untersuchung wurde allerdings aus Tierschutz- und Kostengründen verzichtet. Hinzu kommt, dass auch bei dieser Methode unter Umständen geringgradige Veränderungen nicht erfasst werden und der Nutzen einer solchen zusätzlichen Messung somit fraglich ist. Ein weiterer Erklärungsansatz für die gesteigerte RMR könnte in einer veränderten Atmung liegen. Das Expirationsvolumen stieg durch das Training signifikant an. Da die Atemfrequenz in Ruhe sich allerdings durch das Training nicht änderte, ist das ein Hinweis darauf, dass die Tiere pro Atemzug mehr Sauerstoff aufnahmen. Das wiederum ist durch eine Volumenzunahme der Ein- bzw. Ausatemluft pro Atemzug (entspricht dem erhöhten Expirationsvolumen) in Verbindung mit einer verbesserten Sauerstoffutilisation im Gewebe zu erklären (siehe oben).

Allerdings gibt es auch einige Studien am Menschen, in denen die RMR trotz Ausdauertraining konstant blieb (Broeder et al., 1992; Westerterp et al., 1992).

Ein Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse bezüglich des Trainingseffektes auf die RMR könnte der EPOC sein. Fällt nämlich die Messung der RMR in diesen Zeitraum, so sind die Werte falsch-hoch und eventuelle trainingsbedingte Absenkungen der RMR könnten überdeckt bzw. Erhöhungen der RMR fälschlicherweise als Trainingseffekt interpretiert werden. Auch in der vorliegenden Studie wurden die Ruhemessungen teilweise nur 24 Stunden nach den Belastungsmessungen durchgeführt. Diese Tatsache könnte unter Umständen ein Hinweis darauf sein, dass das Ausmaß des Anstiegs der RMR ohne den Effekt des EPOC nicht signifikant sein würde. Für einen „wirklichen“ Anstieg (also ohne „EPOC-Effekt“) der RMR spricht aber, dass auch in der

Vorgängerstudie von Ruoss (2011) teilweise nur ca. 24 Stunden nach der letzten Belastung gemessen und trotzdem keinerlei Erhöhung der RMR beobachtet wurde.

Die relative Sauerstoffaufnahme und die relative Kohlendioxidabgabe unter Belastung zeigten je nach Geschwindigkeit sehr heterogene Verläufe. Es kam bei allen drei Geschwindigkeiten sowohl bei der Sauerstoffaufnahme als auch bei der Kohlendioxidproduktion vor allem zu einem signifikanten Absinken der Parameter zwischen den Zuständen „trainiert“ (teilweise auch „untrainiert I“) und „untrainiert II“. Laut einer Studie von Hoppeler et al. (1984), ist fehlende Muskelmassenzunahme nach viermonatigem Ausdauertraining keine Erklärung für den in der erwähnten Studie ausbleibenden Effekt auf die Sauerstoffaufnahme. Die genannten Autoren, wie auch oben bereits erwähnt (Blomqvist and Saltin, 1983; Hawley, 2002), erklären eine gesteigerte Sauerstoffaufnahme eher durch kardiovaskuläre Veränderungen in der Durchblutungsrate und damit in der Bereitstellung von Sauerstoff und der gesteigerten Kapillarisation und Mitochondriendichte der Skelettmuskulatur und nicht durch die Zunahme von reiner Muskelmasse. Auch hier könnte die signifikante Körpermassenzunahme wieder einen Erklärungsansatz liefern. Durch das erhöhte Körpergewicht mussten die Tiere mehr Energie einsetzen um die gleiche Leistung bringen zu können. Diesem Ansatz widersprechen die Beobachtungen von Green et al. (2001), die eine lineare Beziehung zwischen der maximalen Sauerstoffaufnahme und dem Körpergewicht zeigen konnten (allerdings bei Vögeln). Demnach müsste also die Sauerstoffaufnahme parallel zur – metabolisch aktiven! – Körpermasse zunehmen. Da es in der vorliegenden Studie trotz der Körpermassenzunahme der Tiere während der trainingsfreien Zeit nicht zu einer Steigerung sondern zu einer Verringerung der Sauerstoffaufnahme kam, liefert diese Tatsache einen Hinweis darauf, dass die Gewichtszunahme wohl vor allem durch eine Zunahme der Fettmasse (und eventuelle Abnahme der metabolisch aktiven Masse) begründet liegt.

Die einzigen Ergebnisse der Belastungstests, die auf einen eventuell vorhandenen Trainingseffekt hinweisen, sind diejenigen bei 8km/h, da hier jeweils signifikante Unterschiede zwischen „untrainiert I“ und „trainiert“ bzw. zwischen „trainiert“ und „untrainiert II“ zu beobachten waren. Eine mögliche Ursache für den ausbleibenden Effekt nach dem Training könnte unter Umständen die zu geringe Belastungsintensität während der Trainingsperiode sein (Gibala and McGee, 2008). Ein weiterer Erklärungsansatz ist eventuell der Verzicht auf die Messung der maximalen

Sauerstoffaufnahme, mit der die meisten anderen Studien gearbeitet haben. Denkbar wäre, dass es durch das Ausdauertraining zwar zu einer Steigerung der maximalen Sauerstoffaufnahme gekommen ist (die aber nicht gemessen wurde), nicht jedoch zu einer Zunahme der Sauerstoffaufnahme unter submaximalen Belastungen. Joyner et al. (2008) bezeichneten diesen Wert als „performance $\dot{V}O_2$ “ (Sauerstoffaufnahme, die eine gewissen Zeit aufrecht erhalten werden kann). Wie nahe diese performance $\dot{V}O_2$ der $\dot{V}O_{2max}$ tatsächlich kommt, ist beim Menschen maßgeblich von Art und Dauer der Belastung abhängig. So können bei einem 10km-Lauf 90%-100% der $\dot{V}O_{2max}$ erreicht werden, bei einem Marathon hingegen nur ca. 75%-85%. Der Erklärung des fehlenden Trainingseffektes auf die performance $\dot{V}O_2$ im Gegensatz zur $\dot{V}O_{2max}$ widersprechen allerdings die Ergebnisse der Studie von Ruoss (2011), in der es zu einem trainingsinduzierten Absinken der performance $\dot{V}O_2$ um 25,35% bzw. um 36,41% bei gleichbleibender RMR kam. In der vorliegenden Studie zeigten Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidproduktion jedoch eher eine Tendenz, im trainierten Zustand anzusteigen. Unter Umständen können solche widersprüchlichen Ergebnisse durch unterschiedlich gestaltete Trainingsarten und vor allem Trainingsdauern erklärt werden.

3.1.2. Stoffwechselquotient unter spezifischer Belastung

Der Quotient aus Leistungsstoffwechsel (metabolic rate, MR) und Ruhestoffwechsel (resting metabolic rate, RMR) drückt die Fähigkeit der Tiere aus, unter Belastung ihren Stoffwechsel auf ein Vielfaches zu steigern. Um diesen Quotienten zu berechnen, wurden die Sauerstoffverbrauchs-Mittelwerte von Schwellentest (12km/h) und Ruhemessung zueinander ins Verhältnis gesetzt. Die Werte des Quotienten der Hunde dieser Studie lagen zwischen 2,67 und 7,72 (der Durchschnitt betrug 4,18), wobei die höchsten Werte im Zustand „untrainiert I“ und die niedrigsten im trainierten Zustand gemessen wurden. Der Leistungsstoffwechsel nahm im trainierten Zustand also einen geringeren Teil des Gesamtstoffwechsels ein. In einer vorhergehenden Arbeit der Arbeitsgruppe Starck an FBIs (Ruoss, 2011), wurden ähnliche Steigerungen des Ruhestoffwechsels erreicht (bis zum 6,45fachen) und auch in anderen Studien an Säugetieren war von Steigerungen bis zum 7fachen bzw. 12,2fachen der RMRs die Rede (Gerth et al., 2010; Hammond and Diamond, 1997; Peterson et al., 1990), somit scheinen die Ergebnisse plausibel. Allerdings muss man mit dem Anstellen solcher Vergleiche vorsichtig sein, da in den erwähnten Studien der wirkliche Ausdauerstoffwechsel (also der Leistungsstoffwechsel über mehrere Tage bzw. Wochen) gemessen und daraus die aerobe Kapazität berechnet wurde. In der

vorliegenden Studie war dies nicht möglich, deshalb handelt es sich bei den vorliegenden Werten nicht um die eigentliche aerobe Kapazität - also um das „Energiebudget pro Zeit, das ein Tier/Mensch über einen bestimmten Zeitraum aufrecht erhalten kann ohne an Körpermasse zu verlieren“ (Hammond and Diamond, 1997) – sondern um ein Maß der Effektivität des Leistungsstoffwechsels unter einer definierten Belastung (in diesem Fall das fünfminütige Laufen bei 12km/h). Die Definition dieses Quotienten bedingt, dass sich die dieser umgekehrt proportional zur RMR verhält. Steigt also die RMR durch das Training an (wie in der vorliegenden Studie), während der Leistungsstoffwechsel aber rel. konstant bleibt, ist mit einem Abfall des Quotienten zu rechnen. Sinkt hingegen die MR (wie in der trainingsfreien Phase), bei gleichbleibender RMR, so sinkt auch der Wert des Quotienten. In der vorliegenden Studie war der Wert des Quotienten im Zustand „untrainiert I“ signifikant höher als im Zustand „trainiert“ und „untrainiert II“. Der trainingsbedingte Abfall des Quotienten ist mit dem Anstieg der RMR bei gleichbleibender MR zu erklären. Da MR und RMR in der trainingsfreien Zeit (mehr oder weniger gleichermaßen) abnehmen, lässt sich der fehlende Effekt der trainingsfreien Phase auf die Effektivität leicht nachvollziehen. Da die RMR zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ keine signifikanten Unterschiede zeigt, die MR im Gegensatz dazu aber signifikant abfällt, ist auch der Rückgang des Wertes des Quotienten im Vergleich von Messphase „untrainiert I“ zu Messphase „untrainiert II“ rechnerisch erklärbar. Da die höchsten Werte im „untrainiert I“-Zustand (also bei relativ geringer RMR) und die niedrigsten im trainierten Zustand (also bei erhöhter RMR) gemessen wurden, ist diese Tatsache ein Hinweis darauf, dass es – zumindest in der vorliegenden Studie – vor allem durch Änderungen der RMR und weniger der MR zu Veränderungen des Stoffwechselquotienten kommt. Diese Beobachtung deckt sich damit, dass in der vorliegenden Studie Training vor allem Effekte auf die RMR und weniger auf die MR hatte.

3.1.3. Effekte des Trainings auf die Atemfrequenz, das Expirationsvolumen und das Atemminutenvolumen

Bisher wurde in den einschlägigen Studien vor allem der Einfluss von Ausdauertraining auf den Sauerstoffverbrauch und das kardiovaskuläre System untersucht (Bove et al., 1979; Gerth, 2010; Musch et al., 1985; Ruoss, 2011). Es existieren jedoch keine publizierten Studien, die auch die Atemmechanik und deren Einfluss auf die oben genannten Parameter mit einbeziehen. Bei jedem Atemzug geht ein relativ großer Teil

der Einatemluft im so genannten Totraum („Raum des Respirationstrakts, der belüftet ist, aber in dem kein Gasaustausch stattfinden kann“ (von Engelhardt and Breves, 2005)) verloren. Die Größe dieses Totraumes bleibt konstant. Aus diesem Grund hat das Volumen der pro Atemzug oder pro Zeiteinheit eingeatmeten Luft großen Einfluss auf die Effektivität der Atmung, da der Anteil des Totraumvolumens am Gesamtvolumen bei flacher Atmung ansteigt. Deshalb wurden in der vorliegenden Studie auch die Atemfrequenz, das Expirationsvolumen und das Atemminutenvolumen im Rahmen der Respirometrie in Ruhe und unter Belastung untersucht.

Die Atemfrequenz in Ruhe änderte sich nach dem Training nicht signifikant, allerdings war sie nach der trainingsfreien Zeit signifikant erhöht. Auch bei der Atemfrequenz unter Belastung kam es vor allem zwischen trainiertem und „untrainiert II“-Zustand zu einem deutlichen Anstieg. Lediglich bei 12km/h konnte zwischen den Messphasen „untrainiert I“ und „trainiert“ ein signifikanter Abfall und damit ein Hinweis auf eine verbesserte Sauerstoffnutzung beobachtet werden. Diese Ergebnisse der Atemfrequenz unter Belastung decken sich mit dem Verlauf der Außentemperatur während des Versuchszeitraumes. Hunde bestreiten ihre Thermoregulation fast ausschließlich über die Wasserverdunstung durch das Hecheln, da sie durch die fehlenden Schweißdrüsen am Körper kaum eine andere Möglichkeit haben, ihre Körpertemperatur zu senken. Young et al. (1959) konnten zeigen, dass ca. 60% der Wärmeableitung von Hunden während des Laufbandtrainings über den Atmungstrakt stattfindet. Daher ist der Anstieg der Atemfrequenz bei steigenden Temperaturen durch eine nötige Thermoregulation zu erklären. Zwar fanden die Messungen im Hundestall bei relativ konstanten Innentemperaturen statt, doch wurden die Hunde unmittelbar vor der Laufbandeinheit von den Ausläufen nach innen verbracht. Somit waren die Tiere bei warmen Außentemperaturen (in Messphase „untrainiert I“ und „untrainiert II“) schon erhitzt und erreichten demnach auf dem Laufband schneller eine kritische Körpertemperatur, die sie mittels Hecheln zu regulieren versuchten, als bei kühlen Außentemperaturen. Für die Thermoregulation erschwerend war außerdem, dass die Hunde unter der Maske zwar hecheln konnten, die Speichelverdunstung aber kaum möglich war. Weiteren Einfluss auf die Atemfrequenz hat sicherlich das Körpergewicht. Die statistisch signifikante Zunahme der Körpermasse während der trainingsfreien Zeit liefert einen Erklärungsansatz für die steigende Atemfrequenz in Ruhe und beeinflusst zusätzlich zu den Außentemperaturen auch die Änderungen der Belastungs-Atemfrequenz.

Training bewirkte eine signifikante Vergrößerung des Expirationsvolumens in Ruhe, die trainingsfreie Zeit eine signifikante Verkleinerung. Somit scheint Ausdauertraining die Atmung durch eine Vergrößerung des Atemvolumens effektiver zu machen. Diese Ergebnisse decken sich mit denen der Sauerstoffaufnahme in Ruhe, die trainingsbedingt anstieg, um nach der trainingsfreien Zeit wieder abzufallen. Da sich die Atemfrequenz in Ruhe, im Gegensatz zur Sauerstoffaufnahme in Ruhe, allerdings durch das Training nicht änderte, ist das ein Hinweis darauf, dass die Tiere pro Atemzug mehr Sauerstoff aufnahmen. Das wiederum ist einmal durch eine reine Volumenzunahme der Ein- bzw. Ausatemluft pro Atemzug (entspricht dem erhöhten Expirationsvolumen) zu erklären. Durch diese Volumenzunahme kann mehr gasaustauschendes Gewebe der Lunge belüftet werden (da der Totraum konstant bleibt), der Gasaustausch wird somit optimiert.

Das Expirationsvolumen unter Belastung zeigt einen umgekehrt proportionalen Verlauf zur Atemfrequenz unter Belastung. Training bewirkt also einen Anstieg des Expirationsvolumens bei gleichzeitigem Abfall der Atemfrequenz. Expirationsvolumen und Atemfrequenz beeinflussen sich gegenseitig, d.h. bei sehr hoher Atemfrequenz muss das Expirationsvolumen zwangsweise sinken. Das geht soweit, dass es sich beim Hecheln um eine fast ausschließliche Totraumbelüftung handelt. Umgekehrt kann die Atemfrequenz relativ niedrig gehalten werden, wenn pro Atemzug viel Sauerstoff in die Lunge bzw. viel Kohlenstoffdioxid aus der Lunge heraus transportiert wird.

Das Atemminutenvolumen steht in direkter Abhängigkeit zum Expirationsvolumen und zur Atemfrequenz (siehe Anhang). Daher verwundert es nicht, dass Ausdauertraining einen Anstieg des Atemminutenvolumens in Ruhe (parallel zum Anstieg des Expirationsvolumens) und die trainingsfreie Zeit einen Abfall (parallel zum Abfall des Expirationsvolumens) bewirkte. Außer bei einer Laufgeschwindigkeit von 5km/h, kam es auch unter Belastung zu Ergebnissen entsprechend zu denen des Expirationsvolumens und der Atemfrequenz bei der jeweils gleichen Geschwindigkeit. Durch das erhöhte Atemminutenvolumen von trainierten Tieren wird die Atmung effektiver. Das heißt das Volumen der eingeatmeten Luft steigt bei gleichbleibendem Totraumvolumen an. Das hat zur Folge, dass mehr gasaustauschendes Gewebe der Lunge belüftet und der Gasaustausch somit optimiert wird.

3.2. Effekte des Trainings auf die Muskulatur

In der vorliegenden Studie wurden die Trainingseffekte auf die Muskulatur mittels Muskeldickemessung mit einem Ultraschallgerät an vier unterschiedlichen Muskeln bzw. Muskelgruppen untersucht.

Bei den Muskeln der Vordergliedmaße, M. supraspinatus mit M. trapezius und M. infraspinatus mit M. deltoideus, konnten keinerlei Veränderungen zwischen den drei Messphasen beobachtet werden. Der M. biceps femoris bzw. M. vastus lateralis war dagegen im Zustand „untrainiert I“ signifikant dicker als im Zustand „trainiert“. Der M. longissimus dorsi zeigte eine Dickenzunahme von Messphase „trainiert“ zur Messphase „untrainiert II“.

Die Tatsache, dass es an der Vordergliedmaße zu keinerlei Muskelmassezu- oder abnahmen kam, ist mit Blick auf die Trainingsart nicht weiter verwunderlich. Wie schon in einigen Studien belegt, kommt es durch reines Ausdauertraining in der Regel zu keiner Muskelhypertrophie sondern vor allem zu funktionellen Anpassungen wie einer verbesserten Kapillarisation oder einer Steigerung der Mitochondriendichte (Hawley, 2002). Auch in der Vorgängerstudie von Ruoss (2011) an FBI-Hunden, konnten keinerlei Dickenveränderungen an der Lokomotionsmuskulatur festgestellt werden. Um eine typische Muskelhypertrophie, also eine Größenzunahme des Muskels durch Zellvergrößerung, zu erreichen, muss der Schwerpunkt des Trainings eher auf der Kraft- und weniger auf der Ausdauerkomponente liegen (Boonyarom and Inui, 2006; Weibel et al., 1992).

Die beobachtete Dickenzunahme des M. longissimus dorsi im Zustand „untrainiert II“ kann mit der signifikanten Körpermassenzunahme der Tiere erklärt werden. Insbesondere an der Lendenmuskulatur kommt es bei Gewichtszunahme zu einer vermehrten intra- und extramuskulären Fettablagerung. Gerade die extramuskulären Fettdepots können unter Umständen, vor allem bei Messungen unter Feldbedingungen und damit verbundenen suboptimalen Licht- und Untersuchungsverhältnissen, nicht immer exakt von der Muskulatur abgegrenzt werden. Die intramuskulären Ablagerungen führen dagegen wirklich zu einer Dickenzunahme des jeweiligen Muskels. Eine weitere mögliche Erklärung ist der Einfluss von Messungenauigkeiten, insbesondere wenn man die absoluten Werte und die dazugehörigen Standardabweichungen betrachtet, die den minimalen Unterschied verdeutlichen.

Eine trainingsbedingte Abnahme der Muskeldicke, wie am M. biceps femoris bzw. M. vastus lateralis zu beobachten, scheint eher unwahrscheinlich, auch wenn nicht

unbedingt eine Dickenzunahme zu erwarten ist. Deshalb ist diese Veränderung wohl durch einen Messfehler zu begründen, da insbesondere an dieser Muskelgruppe schon durch leichte Druckveränderungen an der Ultraschallsonde große Messunterschiede beobachtet werden konnten. Zwar kam es zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“ zu keinen signifikanten Veränderungen des Körpergewichts, aber die Körpermasse der Tiere nahm ab, somit ist eine Verringerung des intramuskulären Fettes als Grund für die geringere Muskeldicke nicht auszuschließen.

Dieser fehlende Trainingseffekt auf die Muskeldicke ist allerdings nicht widersprüchlich zu der beobachteten Erhöhung der performance $\dot{V}O_2$. Eine Steigerung derselben kommt nicht durch eine Vermehrung der Muskelmasse zu Stande, sondern vielmehr durch kardiovaskuläre Veränderungen bei der Bereitstellung von Sauerstoff, v.a. durch eine vermehrte Auswurfleistung des Herzens, verbesserte Kapillarisation und Mitochondriendichte und eine erhöhte Enzymaktivität der Skelettmuskulatur (Hoppeler et al., 1987; Hoppeler et al., 1984; Scheuer and Tipton, 1977).

3.3. Effekte des Trainings auf das kardiovaskuläre System

3.3.1. Effekte des Trainings auf die Herzfrequenz

Entsprechend vieler Studien zum Thema „Trainingseffekte auf die Ruheherzfrequenz und die Herzfrequenz unter submaximaler Belastung“ (Barnard et al., 1980; Billman and Kukielka, 2007; Bingham et al., 1988; Fagard, 1996; Ventura-Clapier et al., 2007) war auch im Rahmen dieser Arbeit mit einer Erniedrigung dieser beiden Parameter zu rechnen. Die Werte der Messung der mittleren Herzfrequenzen in Ruhe, die parallel zur Respirometrie durchgeführt wurde, sanken allerdings lediglich zwischen dem Zustand „trainiert“ und „untrainiert II“, und zeigten keine Veränderungen zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“. Somit kam es – zumindest in dieser und in der vorhergehenden Studie von Ruoss (2011) – zu keinen Trainingseffekten auf die Ruheherzfrequenz. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre das relativ hohe Konditionslevel der Tiere vor Trainingsbeginn, bedingt durch die Haltung in großen Ausläufen. Die mittlere wie auch die maximale Ruheherzfrequenz, die durch ein EKG ermittelt wurde, war im Zustand „untrainiert I“ signifikant höher als im Zustand „trainiert“ und „untrainiert II“, was die Möglichkeit eines Trainingseffektes offen lässt. Allerdings ist keine Erhöhung der Frequenz zwischen dem trainierten und dem „untrainiert II“-Zustand zu erkennen. Die Herzfrequenz ist wahrscheinlich einer der

sensibelsten Indikatoren für physischen und/oder psychischen Stress und somit sehr leicht durch Umweltfaktoren zu beeinflussen (Vincent and Leahy, 1997). Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der circadiane Rhythmus des Organismus, der die geringste HF am frühen Morgen zur Folge hat (Miyazaki et al., 2002). Um diese Einflüsse so gering wie möglich zu halten, wurde in der vorliegenden Studie großer Wert auf eine lange (15 Wochen) Gewöhnungsphase gelegt und darauf geachtet, die Messungen und das Training zu ungefähr denselben Tageszeiten durchzuführen. Nichtsdestotrotz kann eine solche Beeinflussung der Messergebnisse, und damit eine Überdeckung eventueller Trainingseffekte nicht ausgeschlossen werden und eine zunehmende Gewöhnung der Tiere an das Messprozedere gegen Ende der Versuchsphase erklärt die Ergebnisse am ehesten. Auch die Tatsache, dass die minimalen Ruheherzfrequenzen während allen Messphasen konstant blieben, sprechen für eine verringerte Erregbarkeit der Tiere während der Messung in den späteren Messphasen.

Ähnliche Ergebnisse lieferten die Herzfrequenzen unter Belastung. Die Werte, die parallel zur Respirometrie erhoben wurden, und die mittleren Frequenzen des Belastungs-EKGs unterschieden sich zwischen den einzelnen Messphasen nicht. Dieses Ergebnis deckt sich wiederum mit den Beobachtungen von Ruoss (2011), in deren Studie Laufbandtraining keinerlei Effekte auf die Herzfrequenzen unter Belastung hatte. Bei den maximalen Herzfrequenzen kam es bei 5km/h und 12km/h zu einer Erniedrigung, jeweils im Vergleich „trainiert“-„untrainiert II“, was wiederum auf eine verringerte Erregbarkeit der Hunde durch zunehmende Gewöhnung hinweist. Die minimalen Herzfrequenzen zeigten keine Unterschiede bei einer Laufgeschwindigkeit von 8km/h. Bei 5km/h und 12km/h waren die „untrainiert I“- und „trainiert“-Frequenzen allerdings statistisch signifikant niedriger als die im Zustand „untrainiert II“. Da das Körpergewicht der Hunde zum Zeitpunkt der Messphase „untrainiert II“ signifikant höher lag als im Zustand „untrainiert I“ und „trainiert“, lässt sich diese Erhöhung der minimalen Herzfrequenz unter Umständen durch eine Zunahme der Körpermasse in der trainingsfreien Phase und damit verbundener erhöhter Anstrengung bei gleichen Messbedingungen erklären.

Der fehlende Trainingseffekt auf die Herzfrequenzen wurde auch schon in anderen Studien deutlich (Bove et al., 1979; Mackintosh et al., 1983; Stone, 1977). Der mangelnde Trainingserfolg kann unterschiedliche Ursachen haben: Beispielsweise spielt der Ausgangszustand der Probanden eine wichtige Rolle hinsichtlich der Wirkung von Ausdauertraining (Scheuer and Tipton, 1977). So konnte immer wieder beobachtet

werden, dass Tiere, die vor Beginn des Versuches ohne Auslauf in kleinen Zwingern gehalten wurden, oder Menschen, die im Vorfeld der Studie sehr inaktiv waren, schnellere und deutlichere Anpassungsvorgänge aufweisen konnten (Musch et al., 1985). Die Versuchstiere in der vorliegenden Studie wurden auch im Vorfeld des Versuches unter den oben beschriebenen Bedingungen gehalten, hatten also täglich mehrstündigen Auslauf. Die Grundkondition der Tiere war also schon im Zustand „untrainiert I“ wohl deutlich besser, als bei reinen Zwingerhunden. Das könnte eine Erklärung für den mangelnden Trainingseffekt bei dem in dieser Studie angewendeten Training darstellen. Da der Trainingseffekt umso höher wird, je höher die Belastung während des Trainings ist (Gibala and McGee, 2008), könnte auch hier ein Grund für den mangelnden Trainingserfolg liegen. In der erwähnten Studie ist von einer Trainingsintensität die Rede, die etwa 90% der maximalen Leistungsfähigkeit (gemessen an der maximalen Sauerstoffaufnahme) entspricht. Bei Tieren (insbesondere bei sehr eigenwilligen Individuen) ist es allerdings schwer, die Motivation für solche Leistungen zu erreichen und vor allem über den gesamten Trainingszeitraum aufrecht zu erhalten. Scheuer und Tipton (1977) teilten die Trainingsintensität in leichtes (25% der Maximalleistung), mittleres (50% der Maximalleistung), schweres (75% der Maximalleistung) und erschöpfendes (90-100% der Maximalleistung) Training ein. Bei Hunden geben die Autoren eine maximale Herzfrequenz von 260-320 Schlägen pro Minute an. In der vorliegenden Studie liefen die Hunde während des Grundlagentrainings mit einer durchschnittlichen Herzfrequenz von 140-160 Schlägen pro Minute. Geht man also von einer Maximalherzfrequenz von 260 Schlägen pro Minute aus, absolvierten die Beagle lediglich ein mittleres Training (ca. 60% der Maximalleistung). Selbst in den deutlich anstrengenderen Schwellentests erreichten die Herzfrequenzen maximal 240 Schläge pro Minute. Diese Tatsachen sprechen dafür, dass die Trainingsintensität für Veränderungen der Ruhe- und Belastungsherzfrequenz im vorliegenden Versuch zu gering war.

3.3.2. *Effekte des Trainings auf die Herzstruktur*

In der vorliegenden Studie wurden die echokardiographischen Messungen, den Empfehlungen von Lang et al. (2006) entsprechend, im M-Mode vorgenommen. Aus praktischen Gründen und um eine Vergleichbarkeit mit anderen Studien der Arbeitsgruppe Starck zu gewährleisten, fand der Ultraschall jedoch nicht in Seitenlage, sondern an stehenden Hunden statt.

Als Parameter für die Veränderungen der Herzstruktur wurden die Ventrikeldurchmesser und die Wanddicken von linkem Ventrikel und Septum (jeweils in Systole und Diastole) gemessen. Zusätzlich wurde der Durchmesser der Aorta ermittelt.

Die Durchmesser waren im trainierten Zustand (in Systole und Diastole) geringer als im Zustand „untrainiert I“ oder „untrainiert II“. Es ist also ein klarer Trainingseffekt zu erkennen. Besonders augenscheinlich ist die Tatsache, dass es in der vorliegenden Studie nicht, wie beispielsweise bei Stepien et al. (1998), zu einer Erhöhung der Durchmesser kommt, sondern zu einer Verringerung. Eine unter diesen Trainingsbedingungen (reines Ausdauertraining) zu erwartende exzentrische Hypertrophie konnte also nicht beobachtet werden (hierbei würden die Durchmesser größer werden oder zumindest konstant bleiben). Ähnliche Ergebnisse lieferte bereits eine Studie an Grönlandhunden, bei denen es im trainierten Zustand (im Winter wurden die Hunde zum Schlittenziehen genutzt) auch zu einer Abnahme des Durchmessers des linken Ventrikels kam (Gerth, 2010). Parallel zur Verringerung des Ventrikeldurchmessers verloren die Hunde in der erwähnten Studie allerdings auch signifikant an Körpergewicht.

Die Ergebnisse der Wanddickenmessungen lassen keinen systematischen Trainingseffekt erkennen. Während die Wanddicke des linken Ventrikels in der Systole keine Veränderung zeigt, ist sie in der Diastole in den Phasen „untrainiert I“ und „trainiert“ signifikant dicker als bei den „untrainiert II“-Tieren. Ähnliche Ergebnisse können am Septum beobachtet werden, das in Systole und Diastole während den Messphasen „untrainiert I“ und „trainiert“ signifikant dicker ist als im Zustand „untrainiert II“. Somit hat das Ausdauertraining offensichtlich keine Auswirkungen auf die Wanddicken, welche nach der trainingsfreien Zeit geringer sind. Ähnliche Beobachtungen machte auch Ruoss (2011) in ihrer Studie an FBI-Hunden. Dort konnte Training am linken Ventrikel (in Systole und Diastole) keinerlei Veränderungen hervorrufen. Am Septum kam es lediglich in der Systole zu einem signifikanten Anstieg der Dicke zwischen den Zuständen „untrainiert I“ und „trainiert“ und zwischen „untrainiert I“ und „untrainiert II“.

In Studien von Hanton und Lodola (1998), Mashiro et al. (1976) und Della Torre et al. (2000) konnte eine Korrelation diverser echokardiographischer Parameter mit dem Körpergewicht nachgewiesen werden. So zeigte sich zum Beispiel eine lineare

Regression von enddiastolischem Volumen und Körpergewicht (wie auch schon in einer Studie von Crippa et al. (1992)), ebenso wie von Septumdicke und Körpergewicht. Della Torre et al. (2000) konnten außerdem zeigen, dass die Beziehung zwischen echokardiographischen Parametern und der Größe der Körperoberfläche deutlich enger ist als jene zwischen denselben Parametern und der reinen Körpermasse. Auch der Körperbau und die Körperzusammensetzung scheinen in den erwähnten Studien großen Einfluss zu haben, da ähnlich große aber unterschiedlich konstituierte Hunde teilweise deutliche Unterschiede in den echokardiographischen Parametern aufwiesen. Ähnliche Ergebnisse lieferten noch weitere Studien (Boon et al., 1983; O`Grady et al., 1986). Auch in der Arbeit von Gerth (2010) wurde die Abnahme des Ventrikeldurchmessers mit einer erheblichen Gewichtsabnahme der Hunde in Verbindung gebracht. In der vorliegenden Studie kam es allerdings mit der Zunahme an Körpermasse zu einer Verringerung der Wanddicken und des Ventrikeldurchmessers. Somit konnte der oben beschriebene Zusammenhang zwischen echokardiographischen Parametern und dem Körpergewicht nicht nachvollzogen werden.

Während der trainingsfreien Zeit nahmen die Hunde signifikant an Körpermasse zu, was eine Zunahme der Durchmesser erklären könnte. Betrachtet man die absoluten Werte der Wanddicken, so wird deutlich, dass es sich zumindest teilweise um sehr geringe Unterschiede handelt, die leicht durch – trotz aller Bemühungen nicht auszuschließende - Messungenauigkeiten erklärt werden könnten.

3.3.3. *Effekte des Trainings auf die Herzfunktion*

Parameter der Herzfunktion sind: Verkürzungsfraction, Schlagvolumen, die maximale Auswurfgeschwindigkeit und das Geschwindigkeits-Zeit-Integral.

Der rein rechnerisch ermittelte Parameter Verkürzungsfraction, zeigt einen deutlichen Trainingseffekt. Dieser Parameter ist im Zustand „trainiert“ signifikant höher als im Zustand „untrainiert I“ bzw. „untrainiert II“. Die Verkürzungsfraction beschreibt das Ausmaß der Ventrikelkontraktion und spiegelt die Veränderungen in den enddiastolischen bzw. endsystolischen Ventrikeldurchmessern wider. Da die Ventrikeldurchmesser in Systole und Diastole im Zustand „trainiert“ jeweils niedriger waren als in den Zuständen „untrainiert I“ und „untrainiert II“ (siehe Kapitel VII.2.3.2.“), ist die Veränderung der FS folgerichtig. Da die FS ein Maß für die Effektivität der Herzkontraktion ist (Hanton and Lodola, 1998), deutet die Erhöhung dieses Parameters in der vorliegenden Studie somit auf eine Verbesserung der Herzfunktion durch Ausdauertraining hin. Eine trainingsbedingte Veränderung von FS

konnte zwar bisher nur in wenigen Studien (Gerth, 2010; Schaible and Scheuer, 1979) gezeigt werden, doch eine grundsätzliche Verbesserung der Herzfunktion durch eine Erhöhung des Schlagvolumens bzw. durch eine Abnahme der Herzfrequenz unter submaximaler Belastung ist bereits vielfach belegt (Barnard et al., 1980; Fagard, 1996; Schaible and Scheuer, 1979).

Das Schlagvolumen wird als Differenz zwischen enddiastolischem und endsystolischem Ventrikelvolumen definiert. Schlagvolumen und Herzfrequenz stehen in engem Zusammenhang zueinander, da der Körper bemüht ist, die Auswurfleistung des Herzens konstant zu halten (Fritzsche et al., 1999). Somit kommt es in der Regel bei sinkender Herzfrequenz kompensatorisch zu einer Zunahme des Schlagvolumens und umgekehrt. Dieser Zusammenhang lässt sich leicht erklären: Bei einer verminderten Schlagfrequenz des Herzens, hat das Blut länger Zeit in die Ventrikel einzufließen, das enddiastolische Volumen wird größer und damit auch das Schlagvolumen. Dies ist anders, wenn das Herz sehr schnell schlägt. Dann hat die Kammer weniger Zeit sich zu füllen und kann dementsprechend auch weniger Blut auswerfen. Ein weiterer Grund für das bei geringer Herzfrequenz erhöhte Schlagvolumen ist der so genannte Frank-Starling-Mechanismus (von Engelhardt and Breves, 2005). Dieser bewirkt, dass die Kontraktionskraft des Herzens bei vermehrter Wandspannung (hervorgerufen durch die bessere Kammerfüllung) gesteigert wird. Auch, wenn in der Regel die Erhöhung der Herzfrequenz der Grund für ein vermindertes Schlagvolumen ist, so reagiert der Körper aber auch umgekehrt auf ein, z.B. durch pathologische Vorgänge, vermindertes Schlagvolumen, indem er die Herzfrequenz nach oben reguliert (Fritzsche et al., 1999; Scheuer and Tipton, 1977).

In der vorliegenden Studie blieb das Schlagvolumen – wie auch schon in einer anderen Untersuchung der gleichen Arbeitsgruppe (Ruoss, 2011) - während allen drei Messphasen konstant. Vom Menschen sind Studien bekannt, die von einer Zunahme des Schlagvolumens nach Ausdauertraining berichten (Blomqvist and Saltin, 1983; Gilbert et al., 1977), doch ist der Mensch kein guter Proband um auf Auswirkungen auf das Hundeherz Rückschlüsse ziehen zu können. Das hat mehrere Gründe. Einmal sind die Druckverhältnisse durch die grundverschiedene Anatomie (der Mensch steht aufrecht, der Hund „auf allen vieren“) unterschiedlich. Dass diese Tatsache zu großen Varianzen im Trainingseffekt führen kann, verdeutlichte eine Arbeit von Martin et al. (1986), in der Radfahrer in aufrechter und in liegender Position untersucht wurden und teilweise

sehr unterschiedliche Ergebnisse lieferten. Ein zweiter Grund für die mangelhafte Vergleichbarkeit von Menschen- und Hundehertz ist das unterschiedliche Verhältnis von Körpergewicht und Herzgewicht (Hund: 8g/kg Körpergewicht, Mensch: 4-5g/kg Körpergewicht).

Auch beim Hund wurden schon diverse Studien über den Trainingseffekt auf das Schlagvolumen durchgeführt – mit unterschiedlichen Ergebnissen, wobei allerdings die meisten einen Anstieg des Schlagvolumens zu verzeichnen hatten (Barnard et al., 1980; Ritzer et al., 1980; Stone, 1977).

Die Tatsache, dass es in der vorliegenden Studie zu keiner Veränderung des Schlagvolumens kam, ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Erniedrigungen der Herzfrequenzen in Ruhe und unter Belastung wahrscheinlich nicht durch eine funktionelle Anpassungsreaktion des kardiovaskulären Systems, sondern wohl eher durch eine zunehmende Gewöhnung der Tiere zu Stande kam. Würde es sich wirklich um funktionelle Anpassungsreaktionen handeln, wäre bei sinkender Herzfrequenz mit einem Anstieg des Schlagvolumens zu rechnen. Allerdings ist natürlich auch nicht auszuschließen, dass das in dieser Studie durchgeführte Training zwar einen Effekt auf die Herzfrequenzen, nicht jedoch auf den funktionellen Parameter „Schlagvolumen“ hatte. Unter Umständen wäre für einen Einfluss auf das Schlagvolumen intensiveres oder länger andauerndes Training nötig.

Die maximale Auswurfgeschwindigkeit war im Zustand „untrainiert I“ signifikant höher, als im Zustand „untrainiert II“. Das Training hatte somit keinen Effekt auf die Auswurfleistung des Herzens. Betrachtet man die absoluten Werte und die dazugehörigen großen Standardabweichungen (Messphase „untrainiert I“: $19,267\text{cm/s} \pm 2,3\text{cm/s}$, Messphase „untrainiert II“: $17,027\text{cm/s} \pm 2,142\text{cm/s}$), so wird deutlich, dass es sich bei diesem Ergebnis wohl um einen methodenbedingten Messfehler oder um individuelle Schwankungen handelt.

3.4. Effekte auf die freie Aktivität

3.4.1. Effekte der Wochentage

Bei der statistischen Auswertung der Aktivitätsdaten fiel auf, dass die Hunde an den Samstagen signifikant weniger aktiv waren, als an Werktagen, allerdings war die Differenz insgesamt eher gering. Dieser Unterschied lässt sich wohl am ehesten durch das Fehlen äußerer Störfaktoren wie Personenverkehr, Reinigungs- und/oder

Bauarbeiten etc. erklären. Dass solche Irritationen deutlichen Einfluss auf die freie Aktivität von Hunden haben, konnten Yamada und Tokuriki (2000) und Dow et al. (2009) belegen. Auch der subjektive Eindruck der Pfleger bestätigt diesen Effekt. Somit lässt sich die verminderte Aktivität der Hunde an den Samstagen durch eine verringerte Ablenkung und Erregung der Tiere erklären. Warum die Aktivität an den Sonntagen allerdings statistisch die gleiche ist wie unter der Woche, ist schwer zu deuten. Unter Umständen waren die Tiere an den Sonntagen ausgeruht und gelangweilt von den ruhigeren Samstagen und bewegten sich deshalb mehr. Betrachtet man allerdings die absoluten Werte der Aktivitätsmessungen an den Samstagen und Sonntagen, so wird deutlich, dass der Unterschied nur minimal ist (Samstag: 848,849, Sonntag: 892,113). In einer Studie derselben Arbeitsgruppe (Ruoss, 2011) mit Hunden in der gleichen Haltungsumgebung, konnte ein ähnlicher Effekt beobachtet werden. Allerdings waren die Tiere hier an Freitagen, Samstagen und Sonntagen signifikant weniger aktiv als an den restlichen Wochentagen. Diese Ergebnisse sprechen ebenfalls für den Einfluss von äußeren Störfaktoren auf die Aktivität der Hunde und bestätigen den subjektiven Eindruck des Pflegepersonals.

3.4.2. Effekte der unterschiedlichen Versuchsphasen

Die freie Aktivität der Hunde zeigte statistisch signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsphasen. Während der trainingsfreien Zeit waren die Hunde weniger aktiv als während des Trainings bzw. während der Messphase „trainiert“. Keine Unterschiede zeigten sich dagegen zwischen der Messphase „untrainiert I“ und sämtlichen anderen Versuchsphasen. Die freie Aktivität der Hunde blieb also im Versuchsverlauf bis zur Messphase „trainiert“ konstant, um dann gegen Ende (in der trainingsfreien Phase) abzufallen. Einen dazu entgegengesetzten Verlauf zeigt die Außentemperatur, die jahreszeitlich bedingt in der Messphase „trainiert“ signifikant geringer war als in der Messphase „untrainiert II“. Da, wie oben gezeigt, die Außentemperatur signifikanten Einfluss auf die freie Aktivität hat und sich die Tiere umso mehr bewegen, je kälter es wird, lässt sich die Aktivitätsabnahme in den Frühlings- und Sommermonaten (trainingsfreie Zeit) mit den höheren Temperaturen erklären. Da zwischen den Hunden im Zustand „untrainiert I“ und denen im trainierten Zustand keine Unterschiede zu erkennen sind, scheint das Training keinen Einfluss auf die freie Aktivität zu haben. Für eine Erhöhung der freien Aktivität durch Ausdauertraining sprechen allerdings noch die Ergebnisse der reinen Wochenendauswertung. Hier zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen der

Messphase „untrainiert I“ und der Trainingsphase. Betrachtet man also nur die freie Aktivität der Hunde an den Wochenenden (was wahrscheinlich ein unverfälschteres Bild liefert, da die Tiere weniger durch Personenverkehr, Bauarbeiten, Umweltgeräusche etc. gestört werden), führt das Training zu einer Erhöhung. Diese Ergebnisse widersprechen den Resultaten aus Studien (Meijer et al., 1990; Westerterp, 2008) mit Menschen, bei denen es entweder zu keiner Erhöhung der freien Aktivität (bei jüngeren Probanden) oder sogar zu einer vermehrten Inaktivität (bei älteren Testpersonen) kam. Die Ergebnisse der Auswertung aller Wochentage hingegen decken sich mit den genannten Studien, da hier das Training keinen Effekt auf die freie Aktivität hatte.

4. Reversibilität der Trainingseffekte

In den meisten Studien über die Reversibilität von Anpassungsvorgängen des Körpers nach Ausdauertraining war von relativ kurzen Zeitspannen bis zum Rückgang der Veränderungen die Rede. So kam es beispielsweise beim Menschen schon nach einer (Ehsani et al., 1978) bzw. sechs (Shapiro and Smith, 1983) Wochen zur vollständigen Rückbildung aller regulatorischer und struktureller Veränderungen am Herzen. Auch eine Erhöhung der Sauerstoffaufnahme war bereits nach einer zweimonatigen trainingsfreien Zeit vollständig reversibel (Proscurshim et al., 1989). Da Geschwindigkeit und Ausmaß der Rückbildungsvorgänge nach Beendigung von Ausdauertraining in hohem Maße von der Dauer des Bestehens der Veränderungen abhängt (Dickhuth et al., 2004), wurde im Rahmen dieser Studie (viermonatiges relativ moderates Training) beim Aufstellen des Zeitplans davon ausgegangen, dass es innerhalb der dreimonatigen trainingsfreien Zeit zur vollständigen Rückbildung sämtlicher Anpassungsvorgänge kommt.

4.1. Reversibilität der Veränderungen des Energiestoffwechsels

Sowohl die relative Sauerstoffaufnahme als auch die relative Kohlendioxidproduktion in Ruhe zeigte deutliche Trainings- bzw. Inaktivitätseffekte, indem beide Parameter durch das Training anstiegen, um nach der trainingsfreien Zeit wieder abzufallen. Diese Ergebnisse stimmen mit den Beobachtungen anderer Studien überein. So konnten Proscurshim et al. (1989) zeigen, dass die Erhöhung der maximalen Sauerstoffaufnahme nach einer zweimonatigen trainingsfreien Zeit vollständig reversibel war. Anders bei Coyle et al. (1984). Die Autoren untersuchten den Verlust der physiologischen

Anpassungen an jahrelanges Ausdauertraining am Menschen. Die maximale Sauerstoffaufnahme sank zwar signifikant durch die trainingsfreie Zeit, jedoch war sie nach 84 Tagen der Inaktivität immer noch signifikant höher als die einer Kontrollgruppe. Es existieren auch Studien, die in den ersten sechs Wochen der trainingsfreien Zeit keinerlei Rückgang der maximalen Sauerstoffaufnahme beobachten konnten (Henriksson and Reitman, 1977).

Anders verhält es sich mit den beiden Messwerten unter Belastung. Hier kam es lediglich durch die trainingsfreie Zeit zu Veränderungen (relativer Sauerstoffverbrauch und relative Kohlenstoffdioxidproduktion stiegen nach der trainingsfreien Zeit signifikant an). Da dieser Anstieg wohl eher nicht im Zusammenhang mit der vermehrten Inaktivität der Hunde in der trainingsfreien Zeit steht, sondern wahrscheinlich durch die deutliche Körpermassenzunahme der Tiere begründet werden kann, ist diese Veränderung kein typischer Inaktivitätseffekt.

Weitere trainingsinduzierte Effekte auf den Energiestoffwechsel waren ein Anstieg des Expirationsvolumens und damit des Atemminutenvolumens. Beide Werte erreichten nach der dreimonatigen trainingsfreien Zeit wieder ihre „untrainiert I“-Ausgangswerte. Die Veränderungen der Atemmechanik waren damit also ebenfalls vollständig reversibel. Da der Einfluss von Ausdauertraining auf diese Parameter bisher nicht untersucht wurde, fehlen entsprechende Vergleichsstudien. Weitere Arbeiten auf diesem Gebiet wären wünschenswert.

4.2. Reversibilität der Veränderungen der Muskulatur

An zwei der vier untersuchten Muskeln kam es durch Training und Inaktivität zu keinerlei statistisch signifikanten Veränderungen. Die Abnahme der Muskeldicke des M. biceps femoris bzw. des M. vastus lateralis ist, wie oben beschrieben, wohl nicht auf einen Trainingseffekt zurück zu führen. Dementsprechend ist es nicht verwunderlich, dass die trainingsfreie Zeit keinen signifikanten Effekt auf diese Muskelgruppe zeigte. Während der trainingsfreien Zeit wurde der M. longissimus dorsi signifikant dicker im Vergleich zur Messphase „trainiert“. Auch diese Veränderung ist wohl eher durch Messfehler bzw. durch die signifikante Körpermassenzunahme der Tiere zu erklären und dementsprechend kein typischer Inaktivitätseffekt. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass es durch das reine Ausdauertraining zu keinen Veränderungen in der

Muskeldicke der vier untersuchten Muskeln kam und in der trainingsfreien Zeit daher auch keine Rückbildungsprozesse zu beobachten waren.

4.3. Reversibilität der Veränderungen am Herzen

Die hauptsächlichen Trainingseffekte auf das Herz waren eine verminderte mittlere und maximale Ruheherzfrequenz, eine Verbesserung der Herzfunktion (in Form einer erhöhten Verkürzungsfraction) und eine Verminderung der Durchmesser des linken Ventrikels in Systole und Diastole.

Die Ruheherzfrequenzen zeigten nach der trainingsfreien Zeit keinen erneuten Anstieg (die Herzfrequenzen im Zustand „untrainiert II“ waren immer noch signifikant niedriger als im Zustand „untrainiert I“), was ein deutlicher Hinweis dafür ist, dass die nach dem Training beobachtete Erniedrigung des Ruhepulses wohl eher durch die zunehmende Gewöhnung der Tiere an das Messprozedere zu Stande kam, als durch das Ausdauertraining selbst. Somit hatte die trainingsfreie Zeit keinen Effekt auf die Ruheherzfrequenzen.

Die Veränderungen der Herzfunktionsparameter waren während der dreimonatigen trainingsfreien Zeit vollständig reversibel und erreichten in der Messphase „untrainiert II“ wieder ihre Ausgangswerte (Werte der Messphase „untrainiert I“). Ebenso verhielt es sich mit den Ventrikeldurchmessern. Auch diese waren nach der trainingsfreien Zeit statistisch nicht verschieden zum Zustand „untrainiert I“. Zusammenfassend kann man also sagen, dass sämtliche durch das Training am Herzen hervorgerufenen funktionellen und strukturellen Anpassungsvorgänge innerhalb einer dreimonatigen trainingsfreien Zeit vollständig reversibel waren. Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen diverser Studien am Menschen, in denen es teilweise sehr rasch zur vollständigen Rückbildung der Veränderungen am Herzen kam (Ehsani et al., 1978; Fagard, 1996; Shapiro and Smith, 1983). Aber auch am Hund waren bereits nach einer vier- bis fünfwöchigen trainingsfreien Zeit die meisten der trainingsinduzierten Anpassungen verschwunden (Tipton et al., 1974). Entsprechende Ergebnisse lieferte auch eine Studie an schwimmenden Ratten (Hickson et al., 1979), in der 60% des Rückgangs der Veränderungen am Herzen bereits in der ersten Woche der trainingsfreien Zeit zu beobachten waren. Der Grund für die rasche Reversibilität dürfte vor allem in einer sehr schnell wieder gesteigerten sympathischen Aktivität liegen (Coyle et al., 1985). Ein weiterer Grund könnte ein durch die Inaktivität vermindertes Blutvolumen sein. Diesen Ansatz verdeutlichten die Autoren einer Studie von 1986

(Coyle et al.), die ein um 9% verringertes Blutvolumen ihrer Probanden nach der trainingsfreien Zeit feststellten. Indem sie den Probanden Plasmaexpander injizierten, wurde das Blutvolumen wieder erhöht und die kardiovaskulären Veränderungen während der trainingsfreien Zeit konnten dadurch zumindest teilweise wieder rückgängig gemacht werden. Doch es ist Vorsicht geboten bei der Interpretation der Ergebnisse von Studien an Menschen für Rückschlüsse auf den Hund, da die anatomischen und physiologischen Verhältnisse von Mensch und Hund nur schwer zu vergleichen sind. Diese Tatsache bestätigt eine Studie an Menschen in horizontaler und vertikaler Lage (Martin et al., 1986). Beide Probandengruppen wurden durch Radfahren (aufrecht oder in liegender Position) trainiert und der folgende Detrainingsprozess beobachtet. Während es bei Messungen in aufrechter Position nach zwei Monaten Inaktivität zu einem Rückgang der Anpassungsvorgänge kam, konnten diese Veränderungen in liegender Position nicht nachvollzogen werden. Diese Beobachtung spricht dafür, dass im Herzen grundverschiedene Druckverhältnisse und damit Füllungsdrücke vorherrschen, abhängig davon, ob sich das Individuum in liegender (vergleichbar mit der natürlichen Position des Hundeherzens) oder aufrechter Position (natürliche menschliche Haltung) befindet. Eine weitere Studie am Menschen (Blomqvist and Saltin, 1983) konnte sogar zeigen, dass es nach jahrelangem Training selbst nach langer Zeit der Inaktivität zu keinerlei Rückbildungsprozessen am Herzen kam. Die Ergebnisse der diversen Studien widersprechen sich also teilweise und weitere Arbeit auf diesem Gebiet, insbesondere mit Hunden, wäre wünschenswert.

VII. Zusammenfassung

In dieser Studie wurden 10 Beagle über einen Zeitraum von 16 Wochen auf dem Laufband trainiert und im Anschluss trainingsbedingte Veränderungen des Energiestoffwechsels, des Herzens, der Muskulatur und der freien Aktivität untersucht und eine Regressionsgerade für die Korrelation von Sauerstoffverbrauch und Herzfrequenz kleiner Hunde (Beagle) in Ruhe und unter spezifischer Belastung erstellt. Diese Gerade wird durch folgende Gleichung beschrieben.

$$y = 0,312x - 16,382$$

(Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,802 und der Korrelationskoeffizient 0,895)

Die genannte Gleichung erlaubt eine relativ genaue, kostengünstige, einfache und nicht-invasive Abschätzung des Energieverbrauchs anhand der Herzfrequenz kleiner Hunde in Ruhe und unter Belastung. Die verbleibende ca. 20prozentige Restungenauigkeit kann durch die Beeinflussung der Herzfrequenz durch äußere Faktoren (wie zum Beispiel Aufregung, Alter, Geschlecht etc.) erklärt werden. Im Vergleich zu der Regressioneradengleichung, die in einem vorausgegangenem Versuch mit FBI-Hunden (Ruoss, 2011) aufgestellt wurde ($y = 0,320x - 19,299$, $R^2 = 0,769$) unterscheiden sich lediglich die Achsenabschnitte deutlich, während Steigung und Bestimmtheitsmaß sehr ähnlich sind. Bezieht man die Sauerstoffaufnahme in dieser Studie auf metabolische Körpermasse, verschwinden die Unterschiede im y-Achsenabschnitt. Dann kann die Sauerstoffaufnahme für beide Rassen mit folgender Gleichung aus der Herzfrequenz geschätzt werden: $y = 0,65x - 34,91$; $R^2=0,75$

Als Parameter des Energiestoffwechsels wurden der Sauerstoffverbrauch ($\dot{V}O_2$), die Kohlenstoffdioxidproduktion ($\dot{V}CO_2$), die Atemfrequenz, das Expirationsvolumen und das Atemminutenvolumen jeweils in Ruhe und unter definierter Belastung (bei 5km/h, 8km/h und 12km/h) verwendet.

In Ruhe zeigte sich vor allem beim relativen Sauerstoffverbrauch und bei der relativen Kohlenstoffdioxidproduktion ein trainingsbedingter Anstieg (ebenso wie bei 8km/h) und ein nach der trainingsfreien Zeit folgender Abfall.

Die Atemfrequenz ließ im Ruhezustand keinen Trainingseffekt erkennen, unter Belastung (bei 12km/h), sank sie allerdings durch das Training signifikant ab und stieg nach der trainingsfreien Zeit wieder an. Diese Beobachtungen lassen sich unter Umständen mit Veränderungen der Außentemperatur und damit notwendiger Thermoregulation in Form von Hecheln in Verbindung bringen.

Ein Trainingseffekt war auch bei Expirationsvolumen und Atemminutenvolumen zu verzeichnen, die in Ruhe und bei 12km/h im trainierten Zustand signifikant höher waren als vor dem Training bzw. nach der trainingsfreien Zeit. Diese Tatsache ist ein Hinweis darauf, dass Ausdauertraining die Atmung in Form eines erhöhten Expirationsvolumens effektiver macht.

Für die Untersuchung der Trainingseinflüsse auf das Herz wurden die Herzfrequenzen in Ruhe und unter Belastung und echokardiographische Parameter wie Wand- bzw. Septumdicken, Ventrikel- und Aortendurchmesser, Schlagvolumen und Verkürzungsfraktion gemessen. Die Herzfrequenzen ließen, ebenso wie Schlagvolumen und Aortendurchmesser, keinen Trainingseffekt erkennen. Die Wanddicken des linken Ventrikels (in der Diastole) und des Septums (in Systole und Diastole) nahmen im Versuchsverlauf ab. Die Durchmesser des Ventrikels waren nach dem Training geringer als davor bzw. nach der trainingsfreien Zeit. Der trainingsbedingte Anstieg und anschließende Abfall der Verkürzungsfraktion zeigt, dass Ausdauertraining auch einen Effekt auf die Herzfunktion hat. Unter Umständen war die Intensität des in der vorliegenden Studie durchgeführten Trainings zu gering, um auch bei den restlichen Parametern Veränderungen hervorzurufen.

Bei der Untersuchung des Einflusses von Ausdauertraining auf die Dicke der Lokomotionsmuskulatur konnte an keinem der untersuchten Muskeln (M. supraspinatus mit M. trapezius, M. infraspinatus mit M. deltoideus, M. biceps femoris mit M. vastus lateralis und M. longissimus dorsi) ein Trainingseffekt beobachtet werden, was wahrscheinlich in der Trainingsart (reines Ausdauertraining) begründet liegt. Ähnliche Ergebnisse waren bei der Messung der freien Aktivität der Hunde zu erkennen, da diese sich durch das Training nicht signifikant änderte. Lediglich bei Betrachtung der reinen Wochenendaktivitäten waren die Tiere während der Trainingszeit signifikant mehr aktiv als vor bzw. nach dem Training. Diese Tatsache spricht unter Umständen für einen Gewinn an Kondition und damit verbundener erhöhter Bewegungsfreude der Tiere.

Die Parameter des Energiestoffwechsels (Sauerstoffverbrauch, Kohlenstoffdioxidproduktion, Expirationsvolumen und Atemminutenvolumen), und des Herzens (Kammerdurchmesser und Verkürzungsfraktion), die sich durch das Training veränderten erreichten alle nach der dreimonatigen trainingsfreien Zeit wieder ihre Ausgangswerte. Da an der Muskulatur keine Trainingseffekte zu erkennen waren, hatte auch die trainingsfreie Zeit keinen Einfluss auf die Muskeldicken.

Fazit:

Die lineare Regressionsgleichung für das Verhältnis von Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch erlaubt eine einfache, nicht-invasive, kostengünstige und relativ genaue Abschätzung des Energieverbrauchs kleiner Hunde (Beagle) anhand der Herzfrequenzmessung. Dies könnte in Zukunft eine exaktere Bedarfsberechnung gerade für Sport- oder Arbeitshunde ermöglichen. Ausdauertraining hat in dieser Studie vor allem Effekte auf den Energiestoffwechsel und die Herzfunktion, weniger auf die Herzmorphologie oder die Dicke ausgewählter Lokomotionsmuskeln. Der Grund hierfür dürfte in der relativ moderaten Intensität des Trainings liegen. Außerdem wurde in dieser Studie nur reines Ausdauertraining durchgeführt. Bei Trainingsvarianten mit einer Kraftkomponente ist eher mit Veränderungen von Muskeldicke oder Herzmorphologie zu rechnen.

VIII. Summary

In this study 10 beagles were trained on a treadmill over a 16-week period and the influence of this endurance training on energy metabolism, heart, muscles and free activity was examined. Additionally a linear regression line for the correlation between oxygen consumption and heart rate for small dogs at rest and during specific exercise was established.

The linear regression line is described by the following equation:

$$y = 0,312x - 16,382$$

(The coefficient of determination is 0,802 and the coefficient of correlation 0,895)

This equation enables one to estimate the energy requirement by monitoring heart rate of small dogs at rest and during exercise in a relatively accurate, cost-saving, simple and non-invasive way. Other factors influencing heart rate (like agitation, age, sex...) can explain the remaining variation of 20 percent. In comparison with the regression equation of a previous study (Ruoss, 2011) with FBI-dogs ($y = 0,320x - 19,299$, $R^2 = 0,769$), there can only be seen clear differences between axis intercepts, whereas gradients and the coefficients of determination are very similar. If one relate oxygen consumption of this study to metabolic body mass, the differences in axis intercepts disappear. In this case one can estimate oxygen consumption of both breeds by monitoring heart rate with the help of the following equation:

$$y = 0,65x - 34,91; R^2=0,75$$

Oxygen consumption ($\dot{V}O_2$), carbon dioxide production ($\dot{V}CO_2$), respiratory frequency, expiration volume and minute volume as parameters of energy metabolism were measured, both at rest and during defined exercise (at 5km/h, 8km/h and 12km/h).

Concerning relative oxygen consumption and relative carbon dioxide production at rest there can be seen an evident training effect since both values increased after training (as well as at 8km/h) and decreased after detraining.

Respiratory frequency didn't show any training effects at rest, whereas during exercise (at 12km/h) this parameter decreased significantly after training and increased after the following detraining. These observations could possibly be explained by changes in outdoor temperature and the dogs' necessity to hackle, in order to keep their body temperature.

An evident training effect can also be documented concerning expiration volume and minute volume. These parameters were significantly higher after training and lower

after detraining, both at rest and during exercise (at 12km/h). This is an evident allusion to endurance training making breathing more effective by increasing expiration volume. The following parameters were measured for the examination of training effects on the heart: heart rate at rest and during exercise, thickness of septum and left ventricle wall, diameter of the left ventricle and the aorta, stroke volume and shortening fraction. There was no evident training effect concerning heart rates, stroke volume and diameter of the aorta. The thickness of the left ventricle wall (during diastole) and of the septum (during systole and diastole) decreased during this study. After training, the diameter of the left ventricle was lower than before training and after detraining. Shortening fraction shows that there is also an effect on heart function, since shortening fraction increased after training and decreased after detraining. Potentially, the intensity of the training in this study was too low to see changes in the remaining parameters.

There was no training effect on each of the examined muscles (m. supraspinatus with m. trapezius, m. infraspinatus with m. deltoideus, m. biceps femoris with m. vastus lateralis and m. longissimus dorsi). The reason for this observation might be the training mode (pure endurance training). There couldn't be seen any significant changes concerning the free activity of the dogs. However, applying only weekend activity the dogs were significantly more active during as well as after training time. This fact could lead to the conclusion that the dogs' stamina increased and thus showed more free activity.

The parameter of the energy metabolism (oxygen consumption, carbon dioxide production, expiration volume and minute volume) and of the heart (diameter of the left ventricle and shortening fraction), which changed after training all reached their bench marks after three months without training. As there were no training effects on the muscles, there were no changes after detraining.

Conclusion:

With a linear regression equation of the relationship between heart rate and oxygen consumption one can easily estimate the energy requirements of small dogs (beagle) in a non-invasive, affordable and quite accurate way. In the future, this could allow a more precise fulfillment of demand, especially for sporting or working dogs. In this study endurance training particularly had some influence on parameters of energy metabolism and heart function, though it's influence on heart morphology or locomotor muscles was sparse. The comparatively low intensity of the training could be the reason for this

finding. Additionally the dogs underwent only pure endurance training during this study. Using training modes with focal point on strength training, there could be changes in muscle thickness and heart morphology.

IX. Literaturübersicht

- Armstrong, J.D., 1986, Heart rate as an indicator of activity, metabolic rate, food intake and digestion in pike, *Esox lucius*. J. Fish Biol. 29, 207-221.**
- Bacigalupe, L.D., Bozinovic, F., 2002, Design, limitations and sustained metabolic rate: lessons from small mammals. J Exp Biol 205, 2963-2970.**
- Bailie, M.D., Robinson, S., Rostorfer, H.H., Newton, J.L., 1961, Effects of exercise on heart output of the dog. Am J Physiol 16, 107-111.**
- Ballor, D.L., 1991a, Effect of dietary restriction and/or exercise on 23h metabolic rate and body composition in female rats. American Physiological Society.**
- Ballor, D.L., 1991b, Exercise training elevates RMR during moderate but not severe dietary restriction in obese male rats. American Physiological Society.**
- Ballor, D.L., Poehlman, E.T., 1995, A meta-analysis of the effects of exercise and/or dietary restriction on resting metabolic rate. Eur J Appl Physiol 71, 535-542.**
- Barnard, R.J., Duncan, H.W., Baldwin, K.M., Grimditch, G., Buckberg, G.D., 1980, Effects of intensive exercise training on myocardial performance and coronary blood flow. J Appl Physiol 49, 444-449.**
- Bevan, R.M., Speakman, J.R., Butler, P.J., 1995, Daily Energy Expenditure of Tufted Ducks: A Comparison Between Indirect Calorimetry, Doubly Labelled Water and Heart rate. Functional Ecology 9, 40-47.**
- Beyreuther, S., 2007, Korrelation von Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch bei Haushunden als Maß für den Aktivitätsstoffwechsel. Ludwig-Maximilians-Universität München, Department Biologie II.**
- Billman, G.E., Kukielka, M., 2007, Effect of endurance exercise training on heart rate onset and heart rate recovery responses to submaximal exercise in animals susceptible to ventricular fibrillation. J Appl Physiol 102, 231-240.**
- Bingham, S.A., Goldberg, G.R., Coward, W.A., Prentice, A.M., Cummings, J.H., 1988, The effect of exercise and improved physical fitness on basal metabolic rate. British Journal of Nutrition 61, 155-173.**
- Blomqvist, C.G., Saltin, B., 1983, Cardiovascular adaptations to physical training. Ann. Rev. Physiol 45, 169-189.**
- Boon, J., Wingfield, W.E., Miller, C.W., 1983, Echocardiographic indices in the normal dog. Veterinary Radiology 24, 214-221.**
- Boonyarom, O., Inui, K., 2006, Atrophy and hypertrophy of skeletal muscles: structural and functional aspects. Acta Physiologica 188, 77-89.**

- Bove, A.A., Hultgren, P.B., Ritzer, T.F., Carey, R.A., 1979, Myocardial blood flow and hemodynamic responses to exercise training in dogs. *J Appl Physiol* 46, 571-578.
- Broeder, C.E., Burrhus, K.A., Svanevik, L.S., Wilmore, J.H., 1992, The effects of either high-intensity resistance or endurance training on resting metabolic rate. *Am J Clin Nutr* 55, 802-810.
- Brosh, A., Aharoni, Y., Degen, A.A., Wright, D., Young, B., 1998, Estimation of energy expenditure from heart rate measurements in cattle maintained under different conditions. *J Anim Sci* 76, 3054-3064.
- Bundle, M.W., Hoppeler, H., Vock, R., Tester, J.M., Weyand, P.G., 1999, High metabolic rates in running birds. *Nature* 397, 31-32.
- Burger, I.H., Johnson, J.V., 1991, Dogs Large and Small: The Allometry of Energy Requirements within a Single Species. *The Journal of Nutrition* 121, S18-C21.
- Butler, P.J., Green, J.A., Boyd, I.L., Speakman, J.R., 2004, Measuring metabolic rate in the field: the pros and cons of the doubly labelled water and heart rate methods. *Functional Ecology* 18, 168-183.
- Butler, P.J., Woakes, A.J., Boyd, I.L., S., K., 1992, Relationship between heart rate and oxygen consumption during steady-state swimming in California sea lions. *J Exp Biol* 170, 35-42.
- Christensen, C.C., Frey, H., Foensteli, E., Aadland, E., Refsum, H.E., 1983, A critical evaluation of energy expenditure estimates based on individual O₂ consumption / heart rate curves and average daily heart rate. *Am. J. Clin. Nutr.* 37, 468-472.
- Coenen, M., 2010, Remarks on the Benefits of Heart Rate Recordings. *Kentucky Equine Research*, 42-54.
- Coyle, E.F., Hemmert, M.K., Coggan, A.R., 1986, Effects of detraining on cardiovascular response to exercise: role of blood volume. *American Physiological Society*.
- Coyle, E.F., Martin, W.H., Bloomfield, A., Lowry, O.L., Holloszy, J.O., 1985, Effects of detraining on responses to submaximal exercise. *American Physiological Society*.
- Coyle, E.F., Martin, W.H., Sinacore, D.R., Joyner, M.J., Hagberg, J.M., Holloszy, J.O., 1984, Time course of loss of adaptations after stopping prolonged intense endurance training. *American Physiological Society*.
- Crippa, L., Ferro, E., Melloni, E., Brambilla, P., Cavalletti, E., 1992, Echocardiographic parameters and indices in the normal Beagle dog. *Laboratory Animals* 26, 190-195

- Della Torre, P.K., Kirby, A.C., Church, D.B., Malik, R., 2000, Echocardiographic measurements in Greyhounds, Whippets and Italian Greyhounds - dogs with a similar conformation but different size. *Aust Vet J* 78, 49-55.
- Dickhuth, H.H., Lehmann, M., Auch-Schwelk, W., Meinertz, T., Keul, J., 1987, Physical Training, Vegetative Regulation, and Cardiac Hypertrophy. *Journal of Cardiovascular Pharmacology* 10, S71-S78.
- Dickhuth, H.H., Röcker, K., Mayer, F., König, D., Korsten-Reck, U., 2004, Ausdauersport und kardiale Adaptation. *Herz* 4, 373-380.
- Dow, C., Michel, K.E., Love, M., Cimino, D., 2009, Evaluation of optimal sampling interval for activity monitoring in companion dogs. *Am J Vet Res* 70, 444-448.
- Ehsani, A.A., Hagberg, J.M., Hickson, R.C., 1978, Rapid changes in left ventricular dimensions and mass in response to physical conditioning and deconditioning. *Am J Cardiol* 42, 52-56.
- Eston, R.G., Rowlands, A.V., Ingledeew, D.K., 1998, Validity of heart rate, pedometry, and accelerometry for predicting the energy costs of children's activities. *J Appl Physiol* 84, 362-371.
- Evans, D.L., Rose, R.J., 1988, Cardiovascular and respiratory responses to submaximal exercise training in the thoroughbred horse. *Pflügers Arch* 411, 316-321.
- Fagard, R.H., 1996, Athlete's Heart: A Meta-Analysis of the Echocardiographic Experience. *Int J Sports Med* 17, S140-S144.
- Finke, M.D., 1991, Evaluation of the Energy Requirements of Adult Kennel Dogs. *J. Nutr.* 121, S22-28.
- Fritzsche, R.G., Switzer, T.W., Hodgkinson, B.J., Coyle, E.F., 1999, Stroke volume decline during prolonged exercise is influenced by the increase in heart rate. *American Physiological Society*.
- Froget, G., Butler, P.J., Woakes, A.J., 2001, Heart rate as an indicator of oxygen consumption: influence of body condition in the king penguin. *The Journal of Experimental Biology* 204, 2133-2344.
- Froget, G., Handrich, Y., Le Maho, Y., Rouanet, J.L., Woakes, A.J., Butler, P.J., 2002, The heart rate/oxygen consumption relationship during cold exposure of the king penguin: a comparison with that during exercise. *The Journal of Experimental Biology* 205, 2511-2517.
- Gernand, E., Lenz, H., 2005, Nutzung des Ultraschalls in der Schlachtleistungsprüfung und Zuchtwertschätzung für Schafe. *Arch. Tierz.* 2.
- Gerth, N., 2010. *Living at the Extremes - Feeding and Fasting, Resting and Exercise in the Arctic*. Ludwig-Maximilian-Universität, München.

- Gerth, N., Redman, P., Speakman, J.R., Jackson, S., Starck, J.M., 2010, Energy metabolism of Inuit Sled dogs. *J Comp Physiol B* 180, 577-589.
- Gibala, M.J., McGee, S.L., 2008, Metabolic Adaptations to Short-term High-Intensity Interval Training: A Little Pain for a Lot of Gain? *Exerc. Sport. Sci. Rev.* 36, 58-63.
- Gilbert, C.A., Nutter, D.O., Felner, J.M., Perkins, J.V., Heymsfield, S.B., Schlant, R.C., 1977, Echocardiographic Study of Cardiac Dimensions and Function in the Endurance-Trained Athlete. *American Journal of Cardiology* 40, 528-533.
- Gleeson, M., Brown, J.F., Waring, J.J., 1981, The effects of physical exercise on metabolic rate and dietary-induced thermogenesis. *Br J Nutr* 47, 173-181.
- Green, J.A., 2011, The heart rate method for estimating metabolic rate: Review and recommendations. *Comparative Biochemistry and Physiology* 158, 287-304.
- Green, J.A., Butler, P.J., Woakes, A.J., Boyd, I.L., Holder, R.L., 2001, Heart Rate and Rate of Oxygen Consumption of Exercising Macaroni Penguins. *The Journal of Experimental Biology* 204, 673-684.
- Halsey, L.G., Shepard, E.L.C., Hulston, C.J., Venables, M.C., White, C.R., Jeukendrup, A.E., Wilson, R.P., 2007, Acceleration versus heart rate for estimating energy expenditure and speed during locomotion in animals: Tests with an easy model species, *Homo sapiens*. *Zoology* 111, 231-241.
- Halsey, L.G., Shepard, E.L.C., Quintana, F., Gomez Laich, A., Green, J.A., Wilson, R.P., 2009, The relationship between oxygen consumption and body acceleration in a range of species. *Comparative Biochemistry and Physiology* 152, 197-202.
- Hammond, K.A., Diamond, J., 1997, Maximal sustained energy budgets in humans and animals. *Nature* 386, 457-462.
- Hanton, G., Lodola, A., 1998, Echocardiography, a non-invasive method for the investigation of heart morphology and function in laboratory dogs: 2. Effects of minoxidil and quinidine on the left ventricle function. *Laboratory Animals* 32, 183-190.
- Hanton, G., Nahas, K., Priou, C., Rabemampianina, Y., Baneux, P., 2001, The QT interval in the dog ecg: importance in preclinical toxicology and relationship to heart rate. *Toxicology Methods* 11, 21-40.
- Hanton, G., Rabemampianina, Y., 2006, The electrocardiogram of the Beagle dog: reference values and effect of sex, genetic strain, body position and heart rate. *Laboratory Animals* 40, 123-136.
- Hawkins, P.A.J., Butler, P.J., Woakes, A.J., J.R., S., 2000, Estimation of the rate of oxygen consumption of the common eider duck (*somateria mollissima*), with some measurements of heart rate during voluntary dives. *The Journal of Experimental Biology* 203, 2819-2832.

- Hawley, J.A., 2002, Adaptions of skeletal muscle to prolonged, intense endurance Training. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology* 29, 218-222.
- Henriksson, J., Reitman, J.S., 1977, Time course of changes in human skeletal muscle succinate dehydrogenase and cytochrome oxidase activities and maximal oxygen uptake with physical activity and inactivity. *Acta Physiol Scan.* 99, 91-97.
- Hickson, R.C., Hammons, G.T., Holloszy, J.O., 1979, Development and regression of exercise-induced cardiac hypertrophy in rats. *Am. J. Physiol* 236, H268-H272.
- Hill, A.V., 1926, *Muscular Aktivity*. The Williams and Wilkins Co.
- Hill, J.O., Davis, J.R., Tagliaferro, A.R., Stewart, J., 1984, Dietary Obesity and Exercise in Young Rats. *Physiology and Behavior* 33.
- Holter, J.B., Urban, W.E., Hayes, H.H., Silver, H., 1976, Predicting metabolic rate from telemetered heart rate in white-tailed deer. *the Journal of Wildlife Management* 40, 636-629.
- Hoppeler, H., Flück, M., 2002, Normal mammalian skeletal muscle and its phenotypic plasticity. *J Exp Biol* 205, 2143-2152.
- Hoppeler, H., Kayar, S.R., Claasen, H., Uhlmann, E., Karas, R.H., 1987, Adaptive variation in the mammalian respiratory system in relation to energetic demand: III. Skeletal muscles: setting the demand for oxygen. *Respiration Physiology* 69, 27-46.
- Hoppeler, H., Lindstedt, S.L., Uhlmann, E., Niesel, A., Cruz-Orive, L.M., Weibel, E.R., 1984, Oxygen consumption and the composition of skeletal muscle tissue after training and inactivation in the European woodmouse (*Apodemus sylvaticus*). *Journal of Comparative Physiology* 155, 51-61.
- Joyner, M.J., Coyle, E.F., 2008, Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol* 586, 35-44.
- Kienzle, E., Rainbird, A., 1991, Maintenance Energy Requirement of Dogs: What is the Correct Value for the Calculation of Metabolic Body Weight in Dogs? *J. Nutr.* 121, S39-40.
- Klausen, K., Andersen, L.B., Pelle, I., 1981, Adaptive changes in work capacity, skeletal muscle capillarization and enzyme levels during training and detraining. *Acta Physiol Scan.* 113, 9-16.
- Kleiber, M., 1947, Body size and metabolic rate. *Physiological Reviews* 27, 31.
- Lang, R.M., Bierig, M., Devereux, R.B., Flachskampf, F.A., Foster, E., Pellikka, P.A., Picard, M.H., Roman, M.J., Seward, J., Shanewise, J., Solomon, S., Spencer, K.T., Sutton, M.S.J., Stewart, W., 2006, Recommendations for chamber quantification. *Eur J Echocardiography* 7, 79-108.

- Li, R., Deurenberg, P., Hautvast, J.G., 1993, A critical evaluation of heart rate monitoring to assess energy expenditure in individuals. *Am. J. Clin. Nutr.* 58.
- Mackintosh, I.C., Dormehl, I.C., van Gelder, A.L., du Plessis, M., 1983, Blood volume, heart rate, and left ventricular ejection fraction changes in dogs before and after exercise during endurance training. *Am. J. Vet. Res.* ; Vol/Issue: 44:10, Pages: 1960-1962.
- MacMillan, J.S., Davis, L.L., Durham, C.F., Matteson, E.S., 2006, Exercise and heart rate recovery. *Heart and Lung* 35.
- Mai, S. 2006. *Bewegungstherapie für Hunde* (MVS Medizinverlag Stuttgart GmbH & Co. KG).
- Maron, B.J., 1986, Structural Features of the Athlete Heart as Defined by Echocardiography. *JACC* 7, 190-203.
- Martin, W.H., Coyle, E.F., Bloomfield, S.A., Ehsani, A.A., 1986, Effects of Physical Deconditioning After Intense Endurance Training on Left Ventricular Dimensions and Stroke Volume. *J Am Coll Cardiol* 7, 982-989.
- Mashiro, I., Nelson, R.R., Cohn, J.N., Franciosa, J.A., 1976, Ventricular dimensions measured noninvasively by echocardiography in the awake dog. *J Appl Physiol* 41, 953-959.
- Meijer, G.A.L., Janssen, G.M.E., Westerterp, K.R., Verhoeven, F., Saris, W.H.M., ten Hoor, F., 1990, The effect of a 5-month endurance-training programme on physical activity: evidence for a sex-difference in the metabolic response on exercise. *Eur J Appl Physiol* 62, 11-17.
- Mitchell, J.H., Sproule, B.J., Chapman, C.B., 1958, The physiological meaning of the maximal oxygen intake test. *The Journal of Clinical Investigation* 37, 538-547.
- Miyazaki, H., Yoshida, M., Samura, K., Matsumoto, H., Ikemoto, F., Tagawa, M., 2002, Ranges of Diurnal Variation and the Pattern of Body Temperature, Blood Pressure and Heart Rate in Laboratory Beagle Dogs. *Exp. Anim.* 51, 95-98.
- Musch, T.I., Haidet, G.C., Ordway, G.A., Longhurst, J.C., Mitchell, J.H., 1985, Dynamic exercise training in foxhounds I. Oxygen consumption and hemodynamic responses. *American Physiological Society*.
- Nilssen, K.J., Johnsen, H.K., Rognmo, A., Blix, A.S., 1984, Heart rate and energy expenditure in resting and running Svalbard and Norwegian reindeer. *American Journal of Physiology* 246, R963-R967.
- NRC, 2006a, *Nutrient requirements of dogs and cats*. National Academies Press.
- NRC 2006b. *Nutrient Requirements of Dogs and Cats*, Subcommittee on Dog and Cat Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council, eds.

- O`Grady, M.R., Bonagura, J.D., Powers, J.D., Herring, D.S., 1986, Quantitative cross-sectional echocardiography in the normal dog. *Veterinary Radiology* 27, 34-49.
- Ordway, G.A., Floyd, D.L., Longhurst, J.C., Mitchell, J.H., 1984, Oxygen consumption and hemodynamic responses during graded treadmill exercise in the dog. *J Appl Physiol* 57, 601-607.
- Payne, P.R., 1971, Prediction of daily energy expenditure from average pulse rate. *Am. J. Clin. Nutr.* 24.
- Peterson, C.C., Nagy, K.A., Diamond, J., 1990, Sustained metabolic scope *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 87, 2324-2328.
- Pluim, B.M., Zwinderman, A.H., van der Laarse, A., van der Wall, E.E., 2000, The Athlete`s Heart: A Meta-Analysis of Cardiac Structure and Function. *Circulation, Journal of the American Heart Association* 101, 336-344.
- Poehlman, E.T., Danforth, E., 1991, Endurance training increases metabolic rate and norepinephrine appearance rate in older individuals. *Am J Physiol* 261, E233-E239.
- Proscurshim, P., Russo, A.K., Silva, A.C., Picarro, C., Freire, E., Tarasantchi, J., 1989, Aerobic training effects on maximum oxygen consumption, lactate threshold and lactate diappearance during exercise recovery of dogs. *Comparative Biochemistry and Physiology* 94A, 743-747.
- Richard, D., Arnold, J., Leblanc, J., 1986, Energy balance in exercise-trained rats acclimated at two environmental temperatures. *J Appl Physiol* 60, 1054-1059.
- Ritzer, T.F., Bove, A.A., Carey, R.A., 1980, Left ventricular performance characteristics in trained and sedentary dogs. *J Appl Physiol* 48, 130-138.
- Ruoss, C., 2011, Einfluss von Training und Guanidinoacetat-Supplementierung auf den Energiestoffwechsel von FBI-Hunden. Ludwig-Maximilians-Universität München, Department Biologie II.
- Salmons, S., Henriksson, J., 1981, The adaptive response of skeletal muscle to increased use. *Muscle and Nerve* 4, 94-105.
- Schaible, T.F., Scheuer, J., 1979, Effects of physical training by running or swimming on ventricular performance of rat hearts. *J Appl Physiol* 46, 854-860.
- Scharold, J., Gruber, S.H., 1991, Telemetered Heart Rate as a Measure of Metabolic Rate in the Lemon Shark, *Negaprion brevirostris*. *Copeia* 1991, 942-953.
- Scheuer, J., Tipton, C.M., 1977, Cardiovascular Adaptations to Physical Training. *Annual Review of Physiology* 39, 221-251.

- Schmidt-Nielsen, K. 1984. *Scaling why is animal size so important?*, Press, C.U., ed.
- Schneider, S., Bellof, G., Preißinger, W., Spiekers, H., Hitzlsperger, L. 2005. *Die Aussagefähigkeit und der Einsatz der Rückenfettdickenmessung mittels Ultraschall bei Milchkühen der Rasse Fleckvieh (Poing-Grub, Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Land- und Ernährungswirtschaft*
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft), p. 6.
- Schoeller, Webb, 1984, Five-day comparison of the doubly labeled water method with respiratory gas exchange. *Am. J. Clin. Nutr.* 40, 153-158.
- Schulz, L.O., Schoeller, D.A., 1994, A compilation of total daily energy expenditures and body weights in healthy adults. *Am J Clin Nutr* 60, 676-681.
- Schutz, Y., 1997, On problems of calculating energy expenditure and substrate utilization from respiratory exchange data. *Z Ernährungswissenschaft* 36, 255-262.
- Schutz, Y., Weinsier, R.L., Hunter, G.R., 2001, Assessment of Free-Living Physical Activity in Humans: An Overview of Currently Available and Proposed New Measures. *Obes Res* 9, 368-379.
- Shapiro, L.M., Smith, R.G., 1983, Effect of training on left ventricular structure and function. An echocardiographic study. *Br Heart J* 50, 534-539.
- Sharp, T.A., Reed, G.W., Sun, M., Abumrad, N.N., Hill, J.O., 1992, Relationship between aerobic fitness level and daily energy expenditure in weight-stable humans. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 263, E121-128.
- Sneddon, J., Minnaar, P., Grosskopf, J., Groeneveld, H., 1989, Physiological and blood biochemical responses to submaximal treadmill exercise in Canaan dogs before, during and after training. *Journal of the South African Veterinary Association* 60, 87-91.
- Speakman, J.R., Perez-Camargo, G., McCappin, T., Frankel, T., Thomson, P., -Defretin, L., 2001, Validation of the doubly-labelled water technique in the domestic dog (*Canis familiaris*). *British Journal of Nutrition* 85, 75-87.
- Speakman, J.R., Selman, C., 2003, Physical activity and resting metabolic rate. *Proceedings of the Nutrition Society* 62, 621-634.
- Spurr, G.B., Prentice, A.M., Murgatroyd, P.R., Goldberg, G.R., Reina, J.C., Christman, N.T., 1988, Energy expenditure from minute-by-minute heart rate recording: comparison with indirect calorimetry. *Am. J. Clin. Nutr.* 48, 552-559.

- Stepien, R.L., Hinchcliff, K.W., Constable, P.D., Olson, J., 1998, Effect of endurance training on cardiac morphology in Alaskan sled dogs. *J Appl Physiol* 85, 1368-1375.
- Stone, H.L., 1977, Cardiac function and exercise training in conscious dogs. *J Appl Physiol* 42, 824-832.
- Tipton, C.M., Carey, R.A., Eastin, W.C., Erickson, H.H., 1974, A submaximal test for dogs: evaluation of effects of training, detraining, and cage confinement. *Journal of Applied Physiology* 37, 271-275.
- van Bouten, C.V., Westerterp, K.R., Verduin, M., Janssen, J.D., 1994, Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer. *Journal of the American College of Sports Medicine* 26, 1516-1523.
- Ventura-Clapier, R., Mettauer, B., Bigard, X., 2007, Beneficial effects of endurance training on cardiac and skeletal muscle energy metabolism in heart failure. *Cardiovascular Research* 73, 10-18.
- Vincent, I.C., Leahy, R.A., 1997, Real-time non-invasive measurement of heart rate in working dogs: a technique with potential applications in the objective assessment of welfare problems. *The Veterinary Journal* 153, 179-183.
- von Engelhardt, W., Breves, G. 2005. *Physiologie der Haustiere*, p. 682.
- Walsberg, G.E., Hoffman, T.C.M., 2005, Direct calorimetry reveals large errors in respirometric estimates of energy expenditure. *The Journal of Experimental Biology* 208, 1035-1043.
- Weibel, E.R., Bacigalupe, L.D., Schmitt, B., Hoppeler, H., 2004, Allometric scaling of maximal metabolic rate in mammals: muscle aerobic capacity as determinant factor. *Respiratory Physiology & Neurobiology* 140, 115-132.
- Weibel, E.R., Richard Taylor, C., Hoppeler, H., 1992, Variations in function and design: Testing symmorphosis in the respiratory system. *Respiration Physiology* 87, 325-348.
- Weibel, E.R., Taylor, C.R., Hoppeler, H., 1991, The concept of symmorphosis: A testable hypothesis of structure-function relationship. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 88, 10357-10361.
- Weir, J.B.d.V., 1949, New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109, 1-9.
- Westerterp, K.R., 2008, Physical activity as determinant of daily energy expenditure. *Physiology & Behavior* 93, 1039-1043.
- Westerterp, K.R., Meijer, G.A.L., Janssen, E.M.E., Saris, W.H.M., Hoor, F.T., 1992, Long-term effect of physical activity on energy balance and body composition. *British Journal of Nutrition* 68, 21-30.

- Westerterp, K.R., Saris, W.H., van Es, M., ten Hoor, F., 1986, Use of the doubly labeled water technique in humans during heavy sustained exercise. *J Appl Physiol* 61, 2162-2167.
- Weyer, C., Walford, R.L., Harper, I.T., Milner, M., MacCallum, T., Tataranni, P.A., Ravussin, E., 2000, Energy metabolism after 2 y of energy restriction: the Biosphere 2 experiment. *Am J Clin Nutr* 72, 946-953.
- Wickler, S.J., Stern, J.S., Glick, Z., Horwitz, B.A., 1987, Thermogenic Capacity and Brown Fat in Rats Exercise-Trained by Running. *Metabolism* 36, 76-81.
- Wilson, R.P., White, C.R., Quintana, F., Halsey, L.G., Liebsch, N., Martin, G.R., Butler, P.J., 2006, Moving towards acceleration for estimates of activity-specific metabolic rate in free-living animals: the case of cormorant. *Journal of Animal Ecology* 75, 1081-1090.
- Wilterdink, E.J., Ballor, D.L., Keeseey, R.E., 1992, Amount of exercise per day and weeks of training: effects on body weight and daily energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc.* 24, 396-400.
- Wyatt, H.L., Mitchell, J.H., 1974, Influences of Physical Training on the Heart of Dogs. *Circ Res* 35, 883-889.
- Yamada, M., Tokuriki, M., 2000, Spontaneous Activities Measured Continuously by an Accelerometer in Beagle Dogs Housed in a Cage. *J Vet Med Sci* 62, 443-447.
- Young, D.R., Mosher, R., Erve, P., Spector, H., 1959, Body temperature and heat exchange during treadmill running in dogs. *J Appl Physiol* 14, 839-843.
- Zentek, J., Meyer, H. 2005. Ernährung des Hundes.

X. Anhang

1. Technische Daten

1.1. Windmaschine

Tabelle 13: technische Daten der Windmaschine.

| | |
|------------------------|-------------------------|
| Luftmenge max: | 25.000m ³ /h |
| Rotordrehzahl max: | 685/min |
| Gebläsestufen: | 2 |
| Anschlussspannung: | 230V/50Hz |
| Leistungsaufnahme max: | 0,6kW |
| Maße: | 1255 x 410 x 1285mm |
| Gewicht: | 50,8kg |

1.2. Meta-Max-Gerät

Tabelle 14: technische Daten des MetaMax-Gerätes.

| | |
|----------------|--|
| Größe (L/B/H): | Zwei Gehäuseschalen, je 120 x 110 x 45mm |
| Gewicht: | 570g (ohne Batterien) |
| CPU: | 16bit Prozessor, 20MHz, Flash Memory |
| Datenspeicher: | 8MB |

1.3. Televet100

Tabelle 15: technische Daten des Televet 100

| | |
|------------|------------------------------------|
| Kanäle | 2 (entsprechend 3 oder 6 Vektoren) |
| Reichweite | Ca. 100m (über Bluetooth) |
| Batterien | 4 Mignon (Lebensdauer ca. 16h) |
| Frequenz | 0,05 – 100 Hz |

1.4. Actical

Tabelle 16: technische Daten des Acticals

| | |
|--------------------------|-----------------|
| Gewicht | 17 g |
| Größe | 28 x 27 x 10 mm |
| Speicher | 64 kbytes |
| Lebensdauer der Batterie | 180 Tage |

2. Formeln

2.1. Energiestoffwechsel

$$MR = 3,941 \times Q_{O_2} + 1,106 \times Q_{CO_2} - 2,17 \times N_{Ur}$$

$$MR = (3,9 \times Q_{O_2} + 1,1 \times Q_{CO_2}) \times 1,44$$

$$\text{aerobe Kapazität} = \frac{\text{SusMR}}{\text{RMR}}$$

- MR: metabolic rate. Leistungsstoffwechsel
 Q_{O₂}: Menge des verbrauchten Sauerstoffs
 Q_{CO₂}: Menge des produzierten Kohlenstoffdioxids
 N_{ur}: über den Urin ausgeschiedener Stickstoff
 SusMR: sustained metabolic rate, Ausdauerstoffwechsel
 RMR: resting metabolic rate, Ruhestoffwechsel

2.2. Herzfrequenzmessungen

$$V_{O_2} = HF \times SV(C_aO_2 - C_vO_2)$$

- SV: Schlagvolumen des Herzens
 C_aO₂: Sauerstoffgehalt von arteriellem Blut
 C_vO₂: Sauerstoffgehalt von venösem Mischblut
 HF: Herzfrequenz

2.3. Echokardiographie

$$V = [7,0 \div (2,4 + d)] \times d^3$$

$$SV = EDV - ESV$$

$$EF[\%] = (EDV - ESV) \div EDV \times 100 = SV \div EDV \times 100$$

$$FS[\%] = (d_{\text{Diastole}} - d_{\text{Systole}}) \div d_{\text{Diastole}} \times 100$$

| | |
|------|--|
| V: | Ventrikelvolumen in Systole bzw. Diastole [ml] |
| d: | Ventrikeldurchmesser in Systole bzw. Diastole [cm] |
| SV: | Schlagvolumen |
| EDV: | enddiastolisches Volumen des linken Ventrikels |
| ESV: | endsystolisches Volumen des linken Ventrikels |
| EF: | Ejektionsfraktion |
| FS: | shortening fraction, Verkürzungsfraction |

2.4. Respirometrie

$$V_E = V_e \times f_A$$

| | |
|---------|--------------------|
| V_E : | Atemminutenvolumen |
| V_e : | Atemzugvolumen |
| f_A : | Atemfrequenz |

XI. Ehrenwörtliche Erklärung

Erklärungen zur Promotionsordnung (§ 4 Abs. 1 Nr. 2 - 4)

1. Ich erkläre, dass ich die Dissertation selbstständig angefertigt, mich außer den angegebenen keiner anderen Hilfsmittel bedient und alle Stellen, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

.....
(Unterschrift)

2. Ich erkläre, dass ich die vorliegende Dissertation nicht in gleicher oder annähernd ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt oder noch vorliegen habe.

.....
(Unterschrift)

- 3a) Ich habe bereits zu einem früheren Zeitpunkt eine Doktorprüfung bestanden/nicht bestanden.

Ort:

Zeitpunkt:

Thema:

.....
(Unterschrift)

- 3b) Trifft für mich nicht zu, daher entfällt die Frage 3a).

.....
(Unterschrift)

4. Ich habe bereits einmal ein Promotionsgesuch zurückgenommen.

ja/nein

Wenn die Frage mit Ja beantwortet wird, ist anzugeben, wo und wann dies der Fall war und welches Thema bearbeitet wurde.

.....
.....

.....
(Ort, Datum)

.....
(Unterschrift)

XII. Danksagung

Zu allererst möchte ich meinen Betreuern danken, die das Projekt erst möglich gemacht haben und während der Erstellung meiner Dissertation immer ein offenes Ohr für mich hatten.

Vielen Dank an Herrn Prof. Dr. J. Matthias Starck, der jederzeit für mich und meine Sorgen erreichbar war und alle Fragen mehr als geduldig beantwortete.

Herzlichen Dank an Frau Dr. Britta Dobenecker, die mir während der gesamten Versuchsphase immer mit Rat und Tat beiseite stand und dank derer die Arbeit mit den Tieren überhaupt erst möglich geworden ist.

Ein großer Dank geht auch an Frau Prof. Dr. Ellen Kienzle für die Übernahme der Betreuung und die Korrektur dieser Dissertation.

Vielen Dank an Nadine Gerth, der ich mit meinen ständigen Nachfragen und Korrekturwünschen so einiges an Zeit und wahrscheinlich auch an Nerven gekostet habe.

Auch an das gesamte Pfleger- und Tierärzte-Team am Oberwiesenfeld geht ein herzlicher Dank, besonders an Nadja, Chrissi, Adrian, Steffen, Gabi, Nicky, Julia und alle Auszubildende, für ihre Unterstützung und vor allem Geduld mit mir. Ich weiß, manchmal war es nicht leicht den Überblick zu behalten (wer darf jetzt nochmal wann gefüttert werden und wer nicht...?).

Ganz besonders danken möchte ich natürlich auch meinen „fantastischen Zehn“, den Hauptakteuren dieser Studie für ihre (in der Regel) sehr gute Kooperation und für so einige komische Momente, ohne die ich wahrscheinlich (nach acht Stunden neben dem Laufband stehen und frieren) irgendwann durchgedreht wäre.

Vielen herzlichen Dank an Carolin Ruoss, der ich schon im Vorfeld meines Versuches wochenlang über die Schulter schauen und lernen durfte und die auch danach immer ein offenes Ohr und viele hilfreiche Tipps für mich hatte!

Ein großer Dank geht auch an alle Helfer, die mir im Laufe des Versuches immer wieder zur Seite standen. Danke an das Laborteam aus Oberschleißheim, für das unermüdliche Bearbeiten unzähliger Blutproben. Danke an Nina Mädler, ohne deren Unterstützung ich so manche Messung nicht hätte durchführen können. Danke an Julia

Faltermeier für die Beantwortung so mancher Fragen. Danke an alle Studenten und Praktikanten für die Hilfe bei den Biopsien.

Vielen lieben Dank an meine Familie und meine Freunde, die nicht müde wurden sich mein Jammern und Schimpfen anzuhören, die mich immer unterstützt haben und die ihr Bestes gegeben haben, um mich aufzumuntern und abzulenken!

Ein großer Dank auch an meinen Freund, Florian Dollinger. Danke für deine Geduld, dein offenes Ohr und deine Unterstützung! Ohne deinen „technical support“ hätte ich so einige Stunden mehr vor dem Laptop verbringen müssen.

Der größte Dank geht schließlich an meine Eltern, die – im Gegensatz zu mir – nie daran zweifeln, dass ich meine Ziele erreiche und mich immer wieder und unermüdlich daran erinnern, was wirklich wichtig ist im Leben. Vielen Dank für eure permanente und liebevolle Unterstützung!