4. Ergebnisse

Vor Belastungsbeginn (Ruhewert zum Zeitpunkt –10), unmittelbar bei Belastungsende (Zeitpunkt 0) sowie zu 3 bzw. 6 weiteren Zeitpunkten bis 30 min nach Belastungsende, wurden bei allen motorischen Belastungen Parameter zur Beschreibung der Ventilation und Atmungsmechanik, der Effizienz der äußeren Atmung, der Herz-Kreislauf-Funktionen und der Stoffwechsel-Intensität erfasst und berechnet. Aus den im Abschnitt 3.4 dargestellten Gründen wurden zunächst die Belastungstests anhand der Verläufe des arteriellen Sauerstoff-partialdrucks ($P_{a,\,O_2}$) in 7 Statusgruppen eingeteilt. Zusätzlich wurde auf der Grundlage des Symptom-Index (SI) eine Einteilung in Untergruppen vorgenommen. Die Darstellung der Ergebnisse beginnt deshalb mit dem SI und der Einteilung der Statusgruppen.

4.1. Symptom-Index

Auf der Grundlage der Ergebnisse der allgemeinen klinischen Untersuchung sowie der Pathologie und Mikrobiologie wurde zur Einschätzung des Allgemeinzustands hinsichtlich einer Erkrankung des respiratorischen Systems ein SI entsprechend Abschnitt 3.7.1 erstellt. Kälber mit einem SI ≤ 0,1 wurden für den entsprechenden Belastungstest als „klinisch gesund“ eingestuft und der Untergruppe (a) zugeordnet. Dieser Untergruppe (a) gehörten 51 der durchgeführten 79 Belastungstests an. Die 28 Belastungstests mit einem SI > 0,1 wurden der Untergruppe (b) zugeordnet. Die Morbiditätsrate der in die vorliegende Untersuchung einbezogenen Kälber beläuft sich somit auf 35,4 %. Dabei betrug der maximale SI der durchgeführten Belastungstests 0,88; der maximal erreichbare SI = 1,78 (Tab. 26 im Anhang). Aufgrund nicht-respiratorischer Erkrankungen bzw. doppeltem Auftreten innerhalb einer der Statusgruppen Ib bis VI wurden 16 Belastungstests nicht in die Auswertung einbezogen.

4.2. Statusgruppen

Auf der Grundlage der Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdruckes ($P_{a,\,O_2}$) vor und bis 30 min nach Belastung wurden die motorischen Belastungstests der Kälber in sieben Statusgruppen entsprechend Abschnitt 3.7.2 eingeteilt.

Der Statusgruppe I (normoxämisches Niveau: $P_{a,\,O_2}$-Ruhewert > 11,5 kPa; nach Belastung $P_{a,\,O_2}$ > 11,5 kPa und maximal ein Wert zwischen 11,0 und 11,5 kPa) wurden insgesamt 34 Belastungstests zugeordnet.

Davon gehörten zur Untergruppe (**a**) 27 Belastungstests (durchgeführt an 13 Kälbern), wobei 7 motorische Belastungen in der Belastungsstufe A, je 6 in B und C, und 8 in der Belastungsstufe D durchgeführt wurden (Abb. 5, Tab. 25 im Anhang).

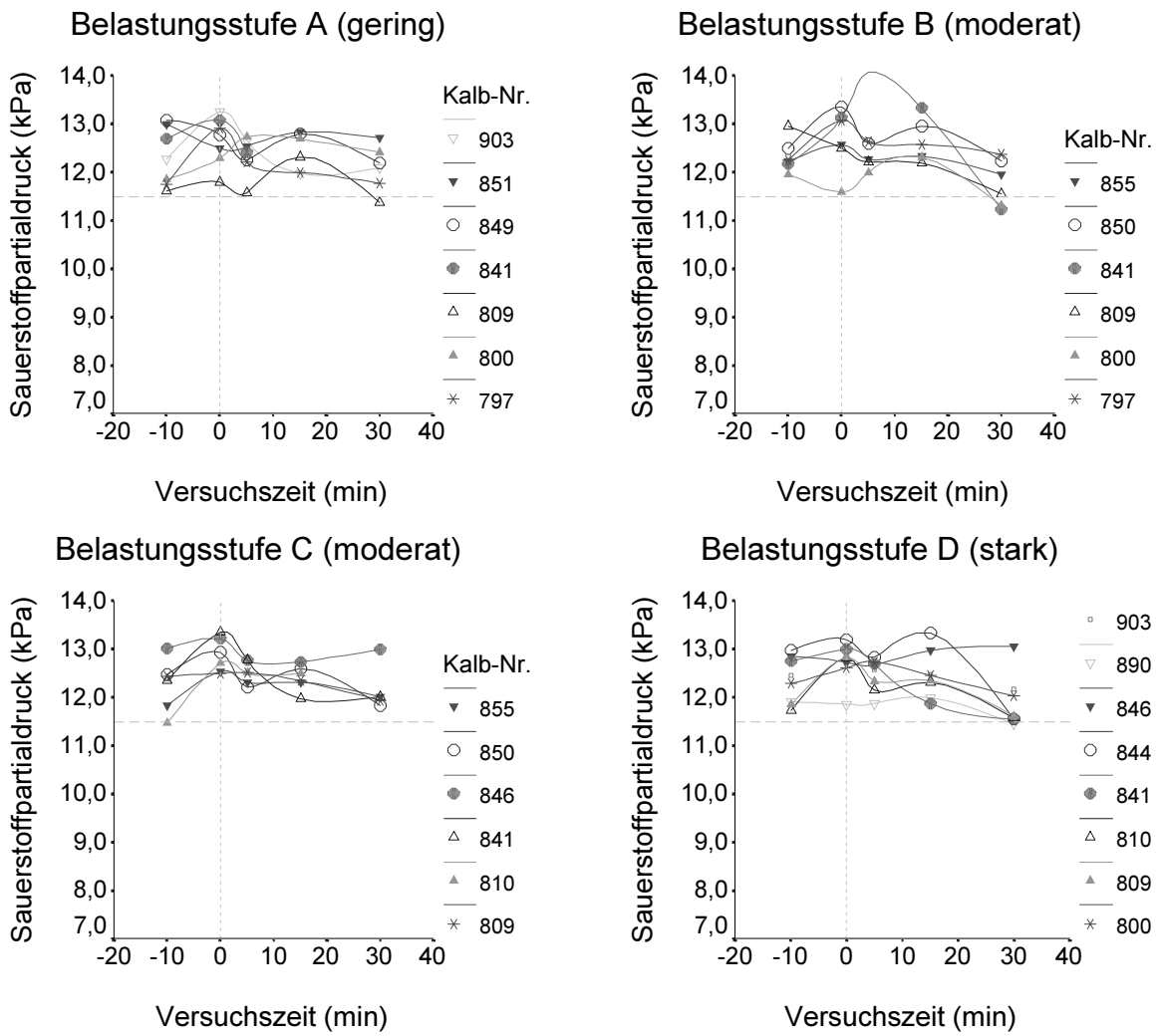

Abb. 5: Status Ia *– Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei „klinisch gesunden" Tieren (Untergruppe a) mit einer normoxämischen P_{a,O_2}-Verlaufsform (Status I: P_{a,O_2}-Ruhewert > 11,5 kPa; nach Belastung P_{a,O_2} > 11,5 kPa und maximal ein Wert zwischen 11,0 und 11,5 kPa).*

Bei den hier eingeordneten Tieren wurde vor Belastungsbeginn (Zeitpunkt –10 min) ein P_{a,O_2} von 12,3 ± 0,5 kPa und nach Belastungsende (Zeitpunkt 0 min) von 12,8 ± 0,5 kPa gemessen. 5 und 15 min nach Belastungsende betrugen die P_{a,O_2}–Werte 12,5 ± 0,4 kPa. 30 min nach Belastungsende fielen die P_{a,O_2}–Werte unter den Ruhe-Ausgangswert ab und lagen bei 12,0 ± 0,5 kPa. Die Spannweite der P_{a,O_2}-Werte lag während des gesamten Belastungstests im Bereich von 11,2 bis 14,1 kPa.

Bei sieben Belastungstests der Statusgruppe I zeigten die Kälber klinische Symptome einer respiratorischen Erkrankung (SI = 0,17 ... 0,57) und wurden der Untergruppe (**b**) zugeordnet (Abb. 6). Dabei wurden vier Belastungstests in der Belastungstufe A (Kalb 801, 810, 848, 852), einer in B (Kalb 846) und zwei in C (Kalb 800, 851) durchgeführt. Die P_{a,O_2}-Werte lagen sowohl vor als auch nach der Belastung im Bereich von 11,6 bis 13,3 kPa.

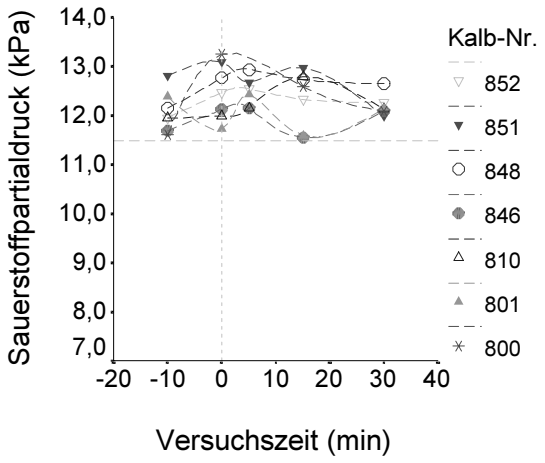

Abb. 6: Status Ib *– Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Tieren mit Symptomen einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe b) und mit einer normoxämischen P_{a,O_2}-Verlaufsform (Status I: P_{a,O_2}-Ruhewert > 11,5 kPa; nach Belastung P_{a,O_2} > 11,5 kPa und maximal ein Wert zwischen 11,0 und 11,5 kPa).*

Der Statusgruppe II mit einer abfallenden P_{a,O_2}-Verlaufsform (P_{a,O_2}-Ruhewert > 11,0 kPa, nach Belastung P_{a,O_2}-Abfall auf Werte < 11,0 kPa) wurden drei Belastungstests zugeordnet, wobei zwei Kälber „klinisch gesund“ waren (Untergruppe (a); Kalb 852 Belastungsstufe C, 853 B) und ein Kalb Symptome einer respiratorischen Erkrankung zeigte (Untergruppe (b); 804 C). Die P_{a,O_2}-Werte fielen von einem mittleren Ruhewert von 11,7 ± 0,1 kPa auf 10,3 ± 0,3 kPa 30 min nach Belastungsende ab (Abb. 7).

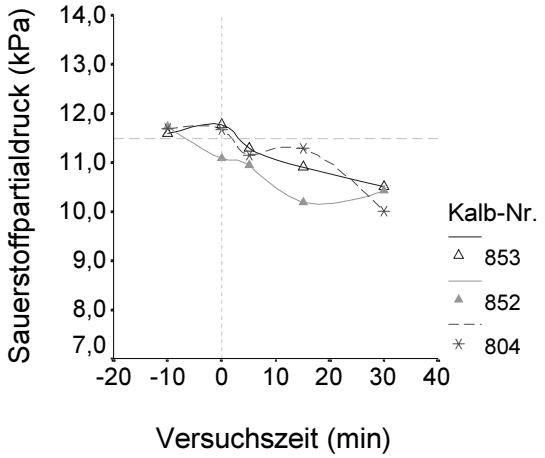

Abb. 7: Status II *- Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei „klinisch gesunden“ Tieren (Untergruppe a, durchgezogene Linie, Kalb 852 und 853) und einem Kalb 804 mit Symptomen einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe b, gestrichelte Linie) mit einer abfallenden P_{a,O_2}-Verlaufsform (Status II: P_{a,O_2}-Ruhewert > 11,0 kPa, nach Belastung P_{a,O_2}-Abfall auf Werte < 11,0 kPa).*

Der Statusgruppe III mit einer V-förmigen P_{a,O_2}-Verlaufsform (P_{a,O_2}-Ruhewert > 11,5 kPa, nach Belastung zunächst P_{a,O_2}-Abfall auf Werte < 11,0 kPa, dann wieder Anstieg des P_{a,O_2} auf Werte > 11,5 kPa) wurden drei „klinisch gesunde“ Kälber zugeordnet (Kalb 797 Belastungsstufe C, 850 D, 856 D). Die mittleren Ruhewerte von 11,7 ± 0,3 kPa fielen nach der Belastung um durchschnittlich 1,6 ± 1,0 kPa ab und erreichten 30 min nach der Belastung Endwerte von 11,7 ± 0,2 kPa (Abb. 8).

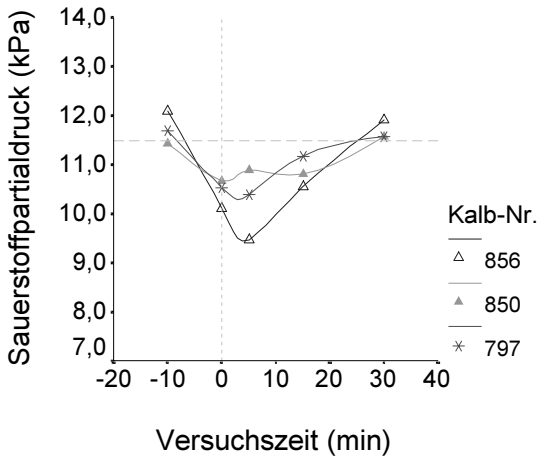

Abb. 8: Status III *- Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei drei „klinisch gesunden" Kälbern mit einer V-förmigen P_{a,O_2}-Verlaufsform (Status III: P_{a,O_2}-Ruhewert > 11,5 kPa, nach Belastung zunächst P_{a,O_2}-Abfall auf Werte < 11,0 kPa, dann wieder Anstieg des P_{a,O_2} auf Werte >11,5 kPa).*

Vier Belastungstests mit einer ansteigenden P_{a,O_2}-Verlaufsform wurden in die Statusgruppe IV (P_{a,O_2}-Ruhewert < 11,0 kPa, nach Belastung P_{a,O_2}-Anstieg um mindestens 1 kPa auf Werte > 11,0 kPa) eingeordnet. Der Untergruppe (a) gehörte das Kalb 844 mit der Belastungsstufe B an. Der Untergruppe (b) wurden drei Belastungstests zugeordnet (796 B, 803 A, 902 D). Die P_{a,O_2}-Werte stiegen nach der Belastung um 2,3 ± 1,0 kPa an und zeigten 30 min nach der Belastung noch immer eine mittlere P_{a,O_2}-Erhöhung von 2,1 ± 1,2 kPa zum Ruhewert (Abb. 9).

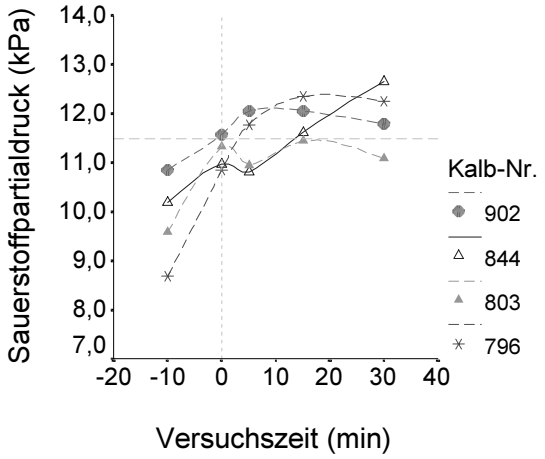

Abb. 9: Status IV *- Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei einem „klinisch gesunden" Kalb 844 (Untergruppe a, durchgezogene Linie) und Tieren mit Symptomen einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe b, gestrichelte Linie, Kalb 796, 803, 902) mit einer ansteigenden P_{a,O_2}-Verlaufsform (Status IV: P_{a,O_2}-Ruhewert < 11,0 kPa, nach Belastung P_{a,O_2}-Anstieg um mindestens 1 kPa auf Werte > 11,0 kPa).*

Der Statusgruppe V mit einer hypoxämischen P_{a,O_2}-Verlaufsform (P_{a,O_2}-Ruhewert < 11,0 kPa und > 10,0 kPa, P_{a,O_2}-Endwerte nach Belastung < 11,0 kPa) wurden 6 Belastungstests zugeordnet. Drei Tiere wurden als „klinisch gesund" eingestuft (Untergruppe (a); Kalb 849 Belastungsstufe C, 852 D, 901 A) und drei zeigten Symptome einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe (b); Kälber 805, 846 und 853 mit der Belastungsstufe A). Die P_{a,O_2}-Werte lagen im Bereich von 9,8 bis 12,0 kPa. Die Ruhewerte betrugen 10,7 ± 0,2 kPa, die P_{a,O_2}-Endwerte 30 min nach der Belastung 10,5 ± 0,5 kPa (Abb. 10).

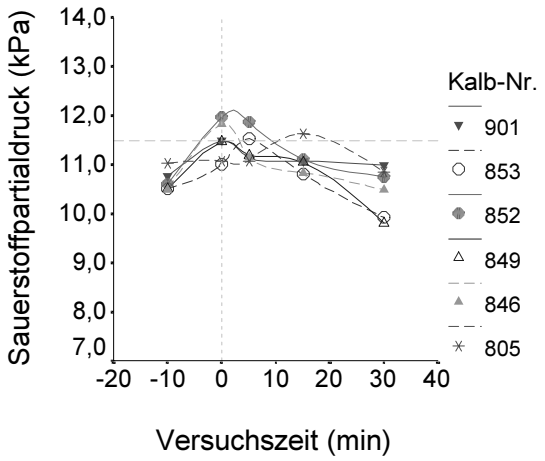

Abb. 10: Status V *- Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei „klinisch gesunden" Tieren (Untergruppe a, durchgezogene Linie, Kalb 849, 852, 901) und Tieren mit Symptomen einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe b, gestrichelte Linie, Kalb 805, 846, 953) mit einer hypoxämischen P_{a,O_2}-Verlaufsform (Status V: P_{a,O_2}-Ruhewert < 11,0 kPa und > 10,0 kPa, P_{a,O_2}-Endwerte nach Belastung < 11,0 kPa).*

Zwei Tiere mit einer stark hypoxämischen P_{a,O_2}-Verlaufsform wurden der Statusgruppe VI (alle P_{a,O_2}-Verlaufswerte < 10,0 kPa) zugeordnet. Beide Kälber zeigten deutliche Symptome einer respiratorischen Erkrankung und wiesen mit einem SI = 0,78 (Kalb 798 Belastungsstufe A) bzw. SI = 0,88 (799 A) die beiden höchsten SI-Werte der durchgeführten Belastungstests auf. Die P_{a,O_2}-Werte lagen im Bereich von 7,5 bis 9,8 kPa (Abb. 11).

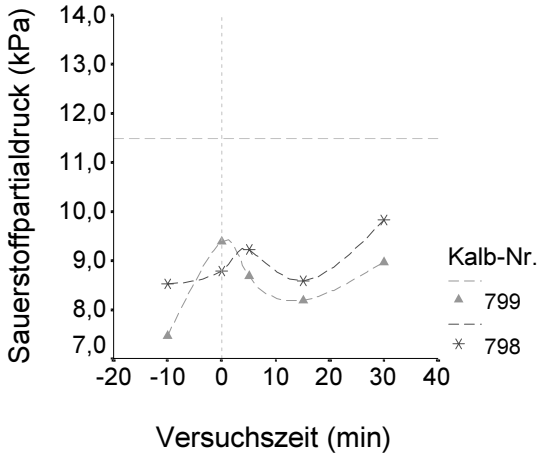

Abb. 11: Status VI *- Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei zwei Kälbern mit Symptomen einer respiratorischen Erkrankung und mit einer stark hypoxämischen P_{a,O_2}-Verlaufsform (Status VI: alle P_{a,O_2}-Verlaufswerte < 10,0 kPa).*

In die Statusgruppen I bis VI nicht zuordenbare P_{a,O_2}-Verläufe wurden der Statusgruppe VII zugeordnet (Abb. 12). Darin wurden vier Kälber am Tag des Belastungstests als „klinisch gesund" eingestuft (Untergruppe (a); Kalb 797 Belastungsstufe D, 844 A, 855 D, 903 C) und sieben Kälber zeigten Symptome einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe (b); Kalb 797 Belastungsstufe A, 844 C, 849 D, 856 A und B, 903 B, 850 A).

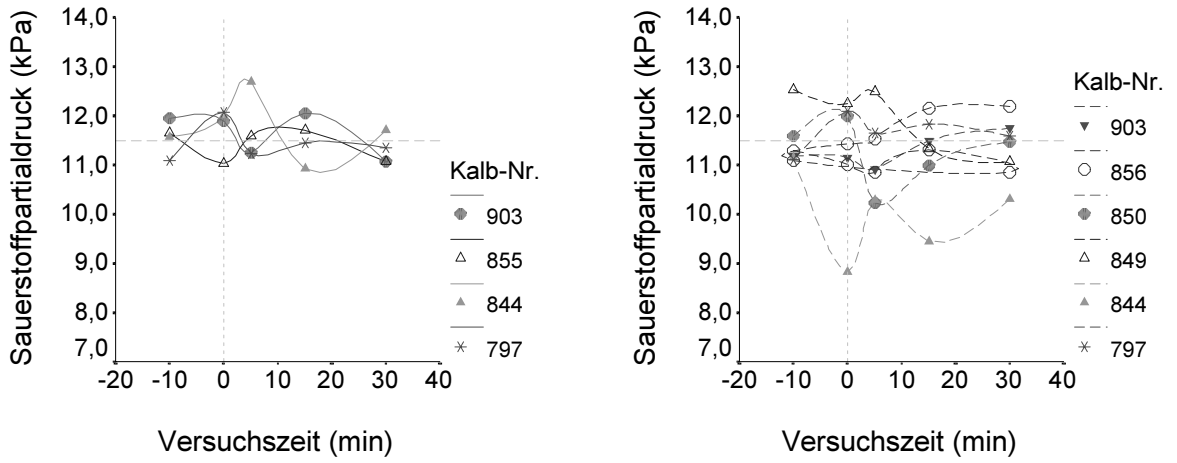

Abb. 12: Status VII *– nicht zuordenbare Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei „klinisch gesunden" Kälbern (Untergruppe (a), durchgezogene Linie, Kalb 797 Belastungsstufe D, 844 A, 855 D, 903 C, linke Grafik) und bei Kälbern mit Symptomen einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe (b), gestrichelte Linie, Kalb 797 Belastungsstufe A, 844 C, 849 D, 856 A und B, 903 B, 850 A, rechte Grafik).*

- Ausgewählte Einzeltierverläufe

Jedes einzelne Kalb wurde innerhalb von 4 Wochen in 4 Belastungstests untersucht. Bei der im Nachhinein vorgenommenen Einteilung in 7 Statusgruppen (I-VII) handelt es sich um eine auf den jeweiligen Testzeitpunkt beschränkte Zuordnung. Lediglich 2 (Kälber 809 und 841) der 28 untersuchten Kälber wurden in allen 4 Belastungstests in die Statusgruppe Ia eingruppiert. Die Dynamik abgelaufener Krankheitsprozesse des respiratorischen Systems wird an drei ausgewählten, sehr markanten Einzeltierverläufen deutlich.

Kalb 846 wurde am 29., 37., 44. und 54. Lebenstag (LT) einem Belastungstest (Stufen D, C, B, A) unterzogen (Abb. 13). Bei den ersten beiden motorischen Belastungen zeigte es einen nahezu identischen, normoxämischen P_{a,O_2}–Verlauf bei einem SI = 0 (Status Ia). Im dritten Belastungstest war der P_{a,O_2} gegenüber den vorangegangenen motorischen Belastungen erniedrigt, aber immer noch der normoxämischen Verlaufsform zuzuordnen. Hier zeigte das Kalb aber Husten und eine erhöhte Körpertemperatur (39,5 °C) seit zwei Tagen (SI = 0,35; Status Ib). Aufgrund dieser Symptomatik wurde das Tier nach diesem dritten Belastungstest an drei aufeinanderfolgenden Tagen antibiotisch und analgetisch/antipyretisch behandelt. Die klinischen Symptome verbesserten sich daraufhin bis zum vierten Belastungstest (SI = 0,225), der P_{a,O_2} fiel jedoch weiter ab und zeigte eine hypoxämische Verlaufsform (Status Vb).

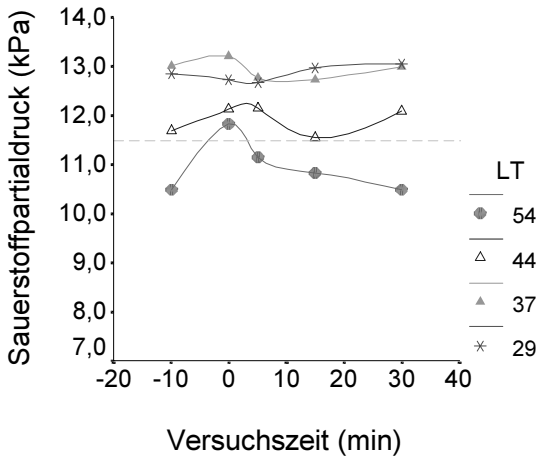

Abb. 13: Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Kalb 846.

Kalb 852 lief am 26., 34., 41. und 46. LT im Versuch (Belastungsstufen A, D, C, B). Bereits vor der ersten motorischen Belastung zeigte es Fieber (41 °C), starken Nasenausfluss und Durchfall und wurde behandelt. Beim ersten Belastungstest betrug der SI 0,2. Das Tier zeigte jedoch eine normoxämische $P_{a,\,O_2}$–Verlaufsform (Status Ib; Abb. 14). Weitere antibiotische und analgetisch/antipyretische Behandlungen wurden nach dem ersten und dem dritten Belastungstest durchgeführt. Der SI betrug bei allen weiteren motorischen Belastungen 0, der $P_{a,\,O_2}$–Verlauf war jedoch beim zweiten Belastungstest erniedrigt (Status Va) und zeigte beim dritten und vierten Belastungstest einen $P_{a,\,O_2}$–Abfall (Status IIa).

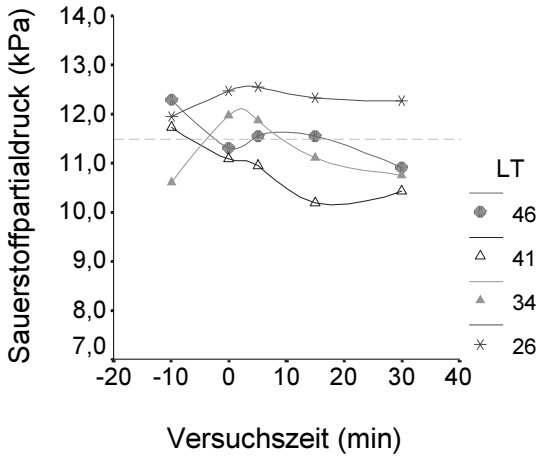

Abb. 14: Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Kalb 852.

Kalb 844 wurde am 18., 23., 30. und 36. LT untersucht (Belastungsstufen C, B, A, D). Der SI sank von 0,45 beim ersten Belastungstest auf 0,08 beim zweiten und 0,00 ab dem dritten. Der $P_{a,\,O_2}$–Verlauf stieg von Versuch zu Versuch an (Abb. 15). Er war zunächst erniedrigt (Status VII, da Ruhe-$P_{a,\,O_2}$ > 11,0 kPa), zeigte beim zweiten Belastungstest einen ansteigenden Verlauf (Status IVa) und beim vierten Belastungstest eine normoxämische Verlaufsform (Status Ia).

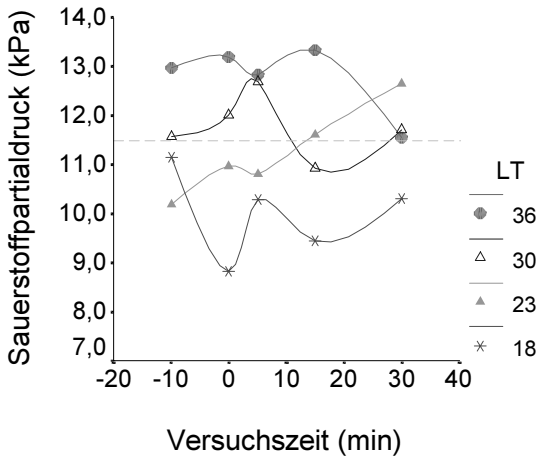

Abb. 15: Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Kalb 844.

4.3. Charakterisierung der Belastungsstufen

Zur Beurteilung der Belastungsintensität wurde der Anstieg der Sauerstoffaufnahme (V_{O_2}) unter Belastung innerhalb der Referenzgruppe (Status Ia) für die einzelnen Belastungsstufen betrachtet (Abb. 16). Eine Abhängigkeit von der Laufbandgeschwindigkeit bzw. der Dauer der Belastung konnte nicht nachgewiesen werden (Kruskal-Wallis-Test: P = 0,45).

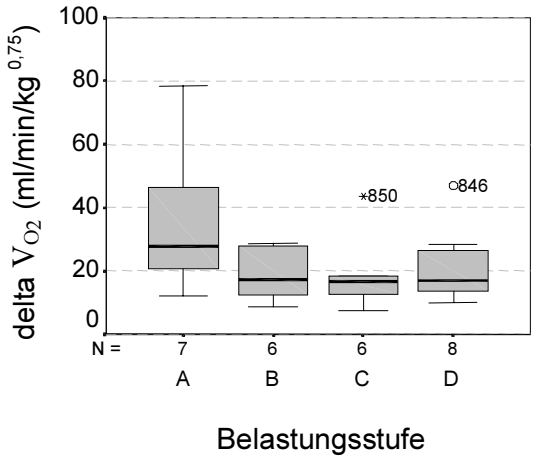

Abb. 16: Anstieg der Sauerstoffaufnahme zum Belastungsende (Zeitpunkt 0 – Ruhewert) in Abhängigkeit von der Belastungsstufe für die 27 Belastungstests der Kälber des Status Ia (n. s.).

Der Quotient der Sauerstoffaufnahme zwischen Belastungsende und Ruhe betrug für die Belastungsstufe A = 1,7 (1,5 – 2,6)
B = 1,5 (1,3 – 1,6)
C = 1,5 (1,3 – 1.5)
D = 1,5 (1,4 – 1.8)

4.4. Effekte durch Alter, Belastungsintensität, Training/Gewöhnung sowie Einfluss klinischer Symptome auf die Funktionen der Atmung

Der ursprüngliche Versuchsplan sah gemäß Abschitt 3.3. eine Untersuchung des Einflusses des Alters, der Belastungsintensität, und der Trainings- bzw. Gewöhnungseffekte auf die Messgrößen vor. Auch mit der veränderten Versuchsdurchführung entsprechend Abschnitt 3.4. bzw. Tab. 22-Tab. 24 im Anhang konnten die oben genannten Einflussgrößen sowie der Einfluss der klinischen Symptomatik (Untergruppen; SI) analysiert werden. Die neue Versuchsanordnung ermöglichte jedoch nicht mehr, die Abhängigkeit eines Effektes bei Konstanthaltung der anderen Einflussgrößen zu untersuchen, da nur noch die 27 Belastungstests des Status Ia mit ihrer ungünstigen Gruppenzusammensetzung (siehe Tab. 25 im Anhang) herangezogen werden konnten. Im Folgenden soll exemplarisch anhand des P_{a,O_2} die Beziehung zwischen den genannten potenziellen Einflussgrößen und den untersuchten Parametern ausführlich beschrieben werden. Eine Darstellung des möglichen Einflusses auf alle anderen Parameter wird am Ende dieses Kapitels kurz zusammengefasst.

- Einfluss des Lebensalters

Um zu untersuchen, ob das Lebensalter der Kälber einen Einfluss auf die Werte des P_{a,O_2} hatte, wurden bei den Belastungstests der Statusgruppe Ia sowohl die P_{a,O_2}-Ruhewerte (Zeitpunkt –10) als auch die Änderung des P_{a,O_2} bis zum Belastungsende (‚Zeitpunkt 0' – ‚Zeitpunkt –10') gegen das Lebensalter aufgetragen (Abb. 17).

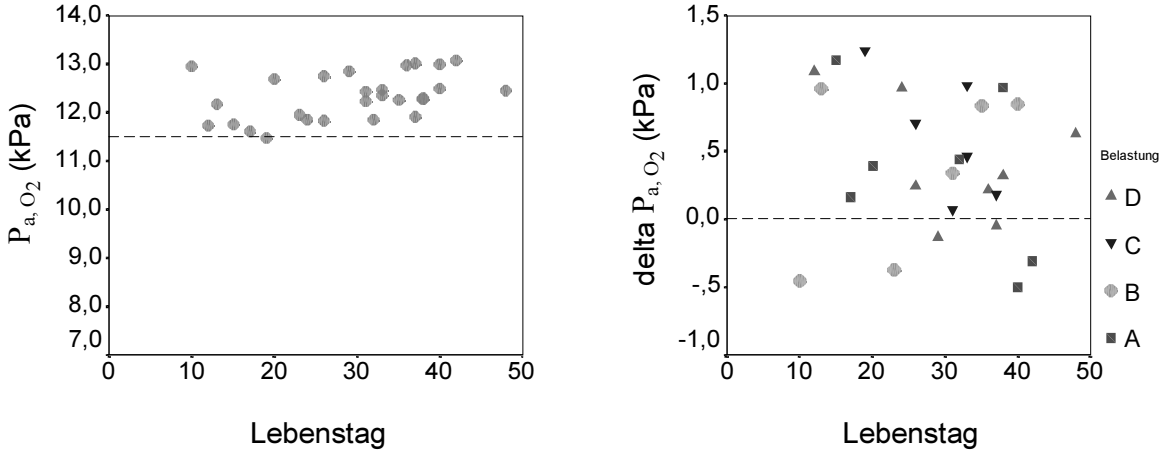

Abb. 17: Arterieller Sauerstoffpartialdruck (P_{a,O_2}) vor Belastungsbeginn (Ruhewert zum Zeitpunkt –10) bei allen 27 Kälbern der Statusgruppe Ia und P_{a,O_2}–Änderung (delta P_{a,O_2}) bis zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) in Abhängigkeit vom Lebensalter.

Der Ruhewert des P_{a,O_2} stieg mit dem Lebensalter der Kälber signifikant an (P = 0,03), der Korrelationskoeffizient nach Pearson betrug allerdings nur 0,42. Bei den Kälbern jünger als 20 Tage (n = 6) betrug der P_{a,O_2} 11,9 ± 0,5 kPa, bei den Tieren älter als 30 Tage (n = 15) 12,5 ± 0,4 kPa. Der Unterschied war statistisch signifikant (U-Test: P = 0,01). Das Lebenalter

hatte jedoch keinen nachweisbaren Einfluss auf die Änderung des P_{a,O_2} bis zum Belastungsende. Dieser Zusammenhang wurde für alle 4 Belastungsstufen separat untersucht, wobei P-Werte > 0,13 auftraten.

- Einfluss der Belastungsintensität

Zur Beurteilung des Einflusses von Stärke und Dauer der Belastung (Belastungsstufen A-D) wurden die Änderungen des P_{a,O_2} bis zum Belastungsende bei den 27 Belastungstests des Status Ia untersucht. Die Belastungsintensität beeinflusste die P_{a,O_2}-Änderung nicht signifikant (Abb. 18; Kruskal-Wallis-Test: P = 0,8).

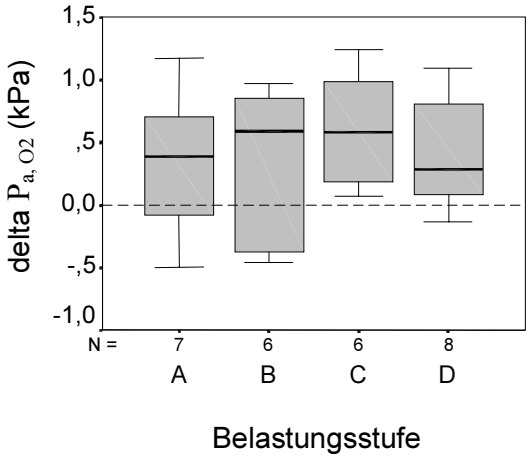

Abb. 18: Differenz des arteriellen Sauerstoffpartialdruckes (delta P_{a,O_2}) zum Zeitpunkt 0 (Belastungsende) und –10 (Ruhewert) in Abhängigkeit von der Belastungsstufe bei den 27 Kälbern der Statusgruppe Ia (n. s.).

- Einfluss von Gewöhnungs- und Trainingseffekten

Ebenfalls bei den Kälbern der Statusgruppe Ia wurde untersucht, ob durch die steigende Zahl der durchgeführten motorischen Belastungen beim gleichen Tier ein möglicher Trainings- oder Gewöhnungseffekt den P_{a,O_2} -Verlauf beeinflusste.

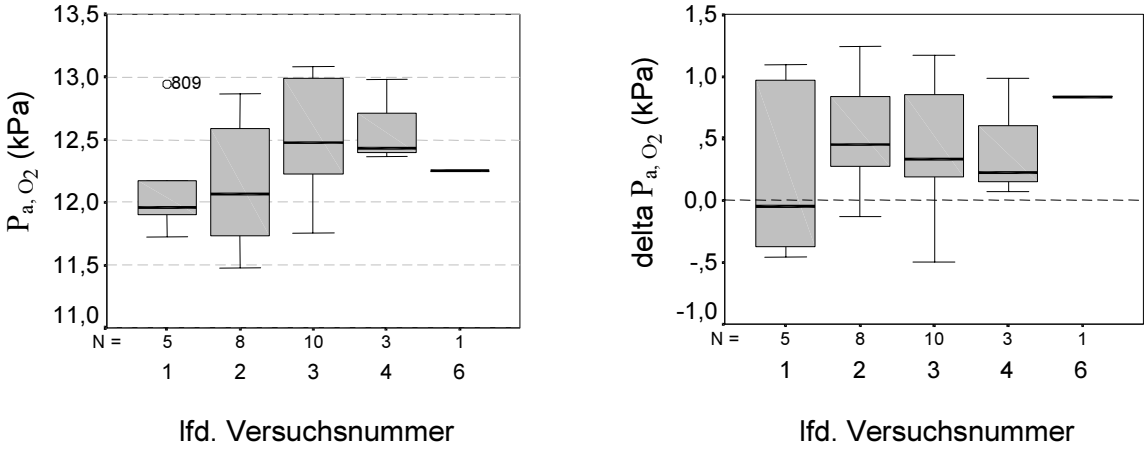

Abb. 19: Arterieller Sauerstoffpartialdruck in Ruhe (linke Grafik, n. s.) und Differenz des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks (delta P_{a,O_2}) zwischen Belastungsende und Ruhe (rechte Grafik, n. s.) in Abhängigkeit von der Anzahl der beim jeweiligen Tier durchgeführten Belastungstests (27 Kälber der Statusgruppe Ia).

Dazu wurde die aktuelle Nummer des beim jeweiligen Tier durchgeführten Belastungstests dem $P_{a,\,O_2}$–Ruhewert und der $P_{a,\,O_2}$–Änderung am Belastungsende gegenübergestellt (Abb. 19). Ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsnummern konnte weder in Ruhe (Kruskal-Wallis-Test: P = 0,23) noch am Belastungsende (Kruskal-Wallis-Test: P = 0,86) nachgewiesen werden.

- Einfluss von klinischen Symptomen einer respiratorischen Erkrankung

Um zu untersuchen, ob der $P_{a,\,O_2}$–Verlauf bei den Kälbern der Statusgruppe I (trotz Erfüllen aller Kriterien für einen normoxämischen Verlauf) Unterschiede in Abhängigkeit vom Auftreten klinischer Symptome einer respiratorischen Erkrankung aufwiesen, wurden die Ruhewerte und die Differenzen des $P_{a,\,O_2}$ bis zum Belastungsende (Abb. 20) der Untergruppen a und b gegenübergestellt. Weder für die Ruhewerte (U-Test: P = 0,22) noch für die Differenzen zwischen Belastungsende und Ruhewert (U-Test: P = 0,87) konnten statistisch signifikante Unterschiede nachgewiesen werden.

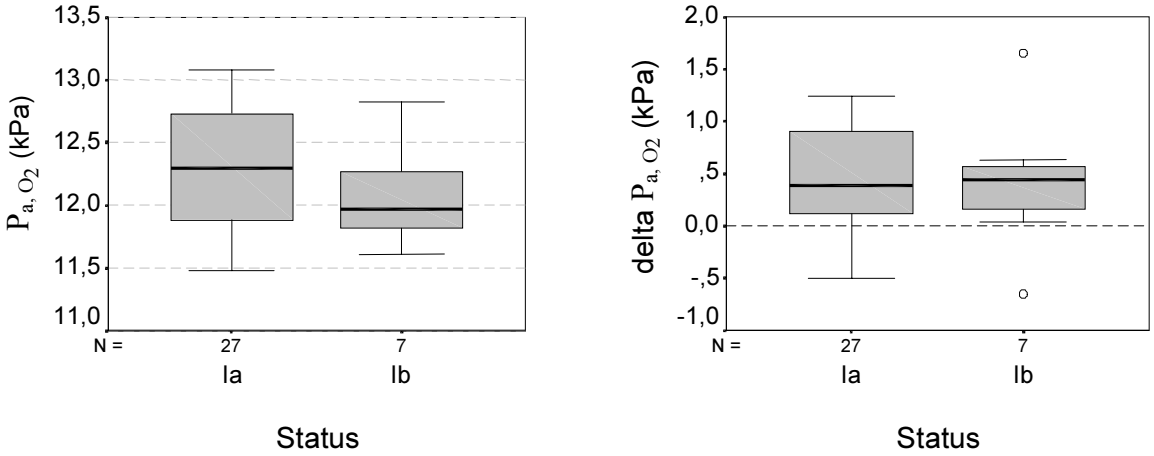

Abb. 20: Ruhewerte des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks ($P_{a,\,O_2}$) (linke Grafik, n. s.) sowie Änderung zum Belastungsende (delta $P_{a,\,O_2}$) – d. h. Differenz des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks) zwischen Belastungsende und Ruhe - (rechte Grafik, n. s.) in Abhängigkeit von den Symptomen einer respiratorischen Erkrankung bei Tieren mit einem normoxämischen $P_{a,\,O_2}$–Verlauf.

Zusätzlich wurde bei allen 63 durchgeführten Belastungstests der Zusammenhang zwischen der Stärke der klinischen Symtome (SI) und dem $P_{a,\,O_2}$-Ruhewert bzw. der $P_{a,\,O_2}$-Änderung am Belastungsende geprüft. Mit steigendem SI fiel der $P_{a,\,O_2}$-Ruhewert statistisch signifikant ab ($P < 0{,}001$), wogegen zwischen dem SI und der $P_{a,\,O_2}$-Änderung kein statistischer Zusammenhang (P = 0,23) nachgewiesen werden konnte (Abb. 21).

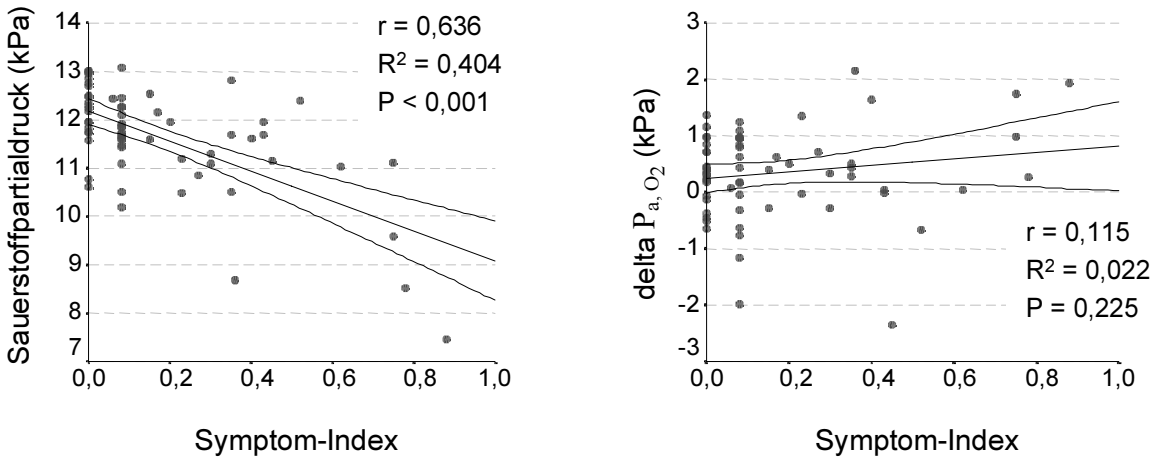

Abb. 21: Arterieller Sauerstoffpartialdruck in Ruhe (linke Grafik) und Änderung zum Belastungsende – d. h. Differenz des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks zwischen Belastungsende und Ruhe - (rechte Grafik) in Abhängigkeit vom Symptom-Index (SI) bei den Kälbern aller 7 Statusgruppen. Die Linien markieren Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der linearen Regression. Angegeben sind außerdem die Parameter der linearen Korrelation nach Pearson.

- Zusammenfassende Darstellung der Effekte auf alle untersuchten Parameter

Wie für den P_{a,O_2} exemplarisch dargestellt, wurde auch für 28 weitere Parameter der mögliche Einfluss des Alters, der Belastungsstufen, von Training und Gewöhnung sowie der klinischen Symptomatik untersucht. Eine Zusammenfassung der statistischen Auswertung befindet sich in Tab. 27 des Anhangs.

Das Alter hatte auf 10 der 29 in Ruhe untersuchten Parameter (Blutgase, Ventilation/Atmungsmechanik, Säuren-Basen-Haushalt, aber nicht auf Kreislaufparamter) einen statistisch signifikanten Einfluss ($P < 0.05$). Der Korrelationskoeffizient nach Pearson lag dabei zwischen 0,39 und 0,63. Der Ruhewert dieser 10 Parameter wurde also nur in geringem Maße durch das Lebensalter determiniert. Die Änderung der 29 Parameter unter Belastung zeigte nur zufällige Beziehungen.

Sowohl die Belastungsstufe als auch Training und Gewöhnung hatten unter den hier gegebenen Versuchsbedingungen keinen nachweisbaren Einfluss. Die zwei bei Training und Gewöhnung gefundenen signifikanten Beziehungen ($P_{\bar{v},CO_2}$, ΔP_a) zeigten bei Betrachtung der Einzeldaten keine physiologisch bedeutsamen oder sinnvollen Unterschiede und müssen deshalb ebenfalls als zufällig angesehen werden.

Im Status I waren die Parameter S_{a,O_2}, $a\bar{v}D_{O_2}$ und O_2Hb in der Untergruppe (a) signifikant höher als in der Untergruppe (b), die Rektaltemperatur war signifikant niedriger. Die Änderung des P_{a,CO_2} wies zwar einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen beiden Untergruppen auf, die Werte der 7 Tiere der Untergruppe (b) lagen jedoch im Wertebereich der Untergruppe (a). Dieser statistische Unterschied wird deshalb nicht als physiologisch bedeutsam eingestuft.

Der Symptom-Index (SI) zeigte mit 13 der 29 Parameter in Ruhe statistisch signifikante Korrelationen, wobei in 9 Fällen $P < 0{,}001$ war (siehe Tab. 27 im Anhang). Der Korrelationskoeffizient lag zwischen 0,26 und 0,69. Die Änderung der Parameter unter Belastung wies nur in 4 Fällen statistisch signifikante Korrelationen auf ($r < 0{,}4$).
Aufgrund dieser beschriebenen Beziehungen zwischen den potenziellen Einflussgrößen und den untersuchten Parametern konnte der Einfluss der Belastungsstufen, von Training und Gewöhnung sowie des Alters bei der weiteren Auswertung und Darstellung der einzelnen Parameter vernachlässigt werden. Alle Belastungstests wurden in ihrer jeweiligen Statusgruppe zusammengefasst und einheitlich betrachtet. Für die Statusgruppe I wurde der Einfluss der klinischen Symptomatik (Untergruppe a/b) berücksichtigt und somit wurden nur die Belastungstests des Status Ia als physiologischer Referenzbereich für alle Parameter unter den gegebenen Versuchsbedingungen herangezogen. Für alle anderen Statusgruppen konnte aufgrund der geringen Anzahl von Belastungstests je Gruppe diese Differenzierung in der Auswertung der Parameter nicht sinnvoll vorgenommen werden.

4.5. Ventilation und Atmungsmechanik

Die 7 Statusgruppen bzw. deren Übergruppen K (keine respiratorische Insuffizienz), L (latente respiratorische Insuffizienz), M (manifeste respiratorische Insuffizienz) und ? (den Statusgruppen nicht zuordenbare Verläufe) waren die Grundlage für die Auswertung aller Parameter (Tab. 19). Für jeden motorischen Test wurde der Verlauf des auszuwertenden Parameters – zusammengefasst in den 7 Statusgruppen - graphisch dargestellt (siehe 4.2). Der Verlauf der Statusgruppe Ia (normoxämisches $P_{a,\,O_2}$ – Niveau, klinisch gesund) vor und nach der Belastung wurde für alle gemessenen und berechneten Parameter als Referenzbereich (für die gegebenen Versuchsbedingungen) herangezogen. Die Verläufe in den anderen Statusgruppen bzw. Übergruppen wurden dem Referenzbereich gegenübergestellt. In der folgenden Darstellung der Ergebnisse aller Messgrößen wurden für die Statusgruppen Ib - VII nur die Abweichungen von den als Referenzbereich definierten Werten gezeigt.

4.5.1. Atmungsfrequenz

Die Kälber wiesen am Versuchstag im Stall mit $30 \pm 10\ \text{min}^{-1}$ eine signifikant niedrigere Atmungsfrequenz ($\mathbf{f_R}$) auf als in Ruhe auf dem Laufband (nach 30 min Adaptationszeit) mit $40 \pm 16\ \text{min}^{-1}$ (Wilcoxon-Test: $P < 0{,}001$; Abb. 22). Bei den Kälbern mit klinischen Symptomen einer respiratorischen Erkrankung (Untergruppe b) wurden im Stall signifikant höhere f_R-Werte beobachtet als bei den klinisch gesunden Kälbern (Untergruppe a; Mann-Whitney-Test: $P = 0{,}001$; Abb. 22).

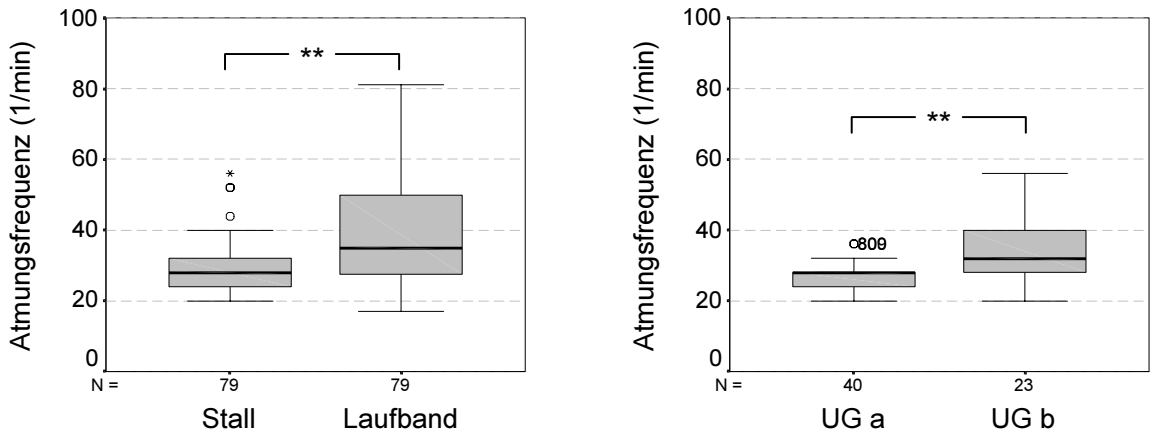

*Abb. 22: Atmungsfrequenz am Versuchstag im Stall und in Ruhe auf dem Laufband (Zeitpunkt –10) bei allen 79 Belastungstests (linke Grafik, **Wilcoxon-Test: P < 0,001) sowie Atmungsfrequenz im Stall bei Kälbern ohne (Untergruppe a) und mit (Untergruppe b) klinischen Symptomen einer respiratorischen Erkrankung (rechte Grafik, **U-Test: P = 0,001).*

Die ergometrische Belastung führte bei den Kälbern der Statusgruppe **Ia** zu einem signifikanten Anstieg von f_R (Wilcoxon-Test: P < 0,001) um 33,4 % (20,1 % - 52,3 %) von 39 ± 10 min^{-1} in Ruhe auf 56 ± 20 min^{-1} am Belastungsende (Abb. 23). Nach 30 min Erholung wurde das Ruhe-Niveau wieder eingenommen. Bei den Belastungstests von Kalb Nr. **841** (des Status Ia) trat in den Belastungsstufen A und B ein paralleler, jedoch erhöhter Verlauf von f_R auf.

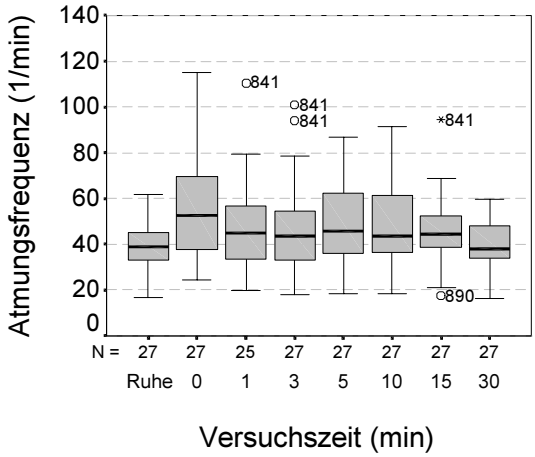

Abb. 23: Atmungsfrequenz vor und nach der motorischen Belastung bei allen Belastungstests des Status Ia. Der Anstieg vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

In der Statusgruppe **Ib** zeigte nur Kalb-Nr. **800** eine abweichende Verlaufsform von der Referenzgruppe: Abfall der f_R von 63 min^{-1} in Ruhe auf 46 min^{-1} am Belastungsende; dann stetiger Anstieg bis auf 99 min^{-1} nach 30 min Erholung.

Bei den Kälbern mit Symptomen einer **manifesten** respiratorischen Insuffizienz lagen die f_R-Ruhewerte mit 45 ± 20 min^{-1} tendenziell höher als die des Referenzbereichs, und nach dem f_R-Anstieg am Belastungsende wurden auch nach 30 min Erholung die Ruhewerte nicht wieder erreicht (Abb. 24). Nur Kalb Nr. **803** des Status **IV** zeigte einen abweichenden Verlauf von f_R: Abfall von 77 min^{-1} in Ruhe auf 60 min^{-1} am Belastungsende und dann stetiger Anstieg der f_R auf 91 min^{-1} nach 30 min Erholung.

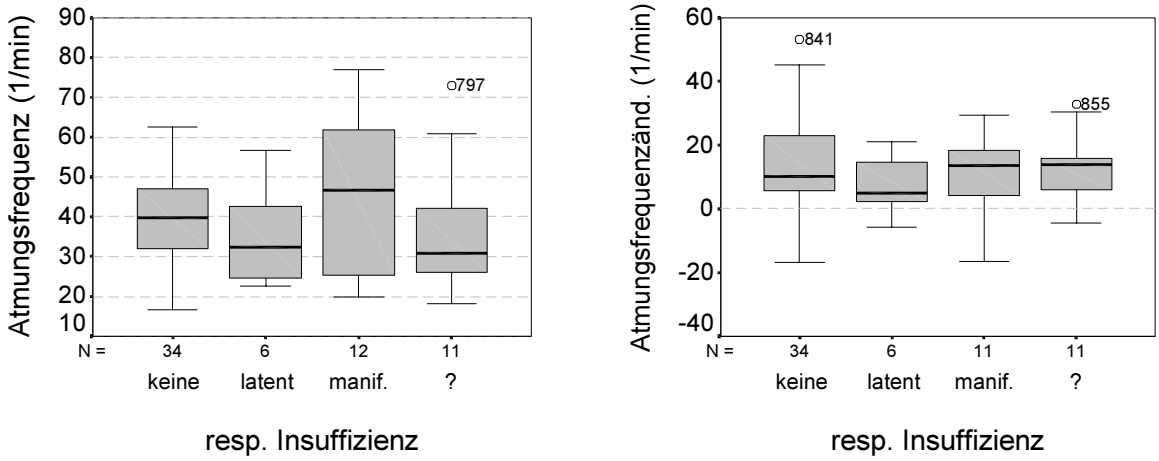

Abb. 24: Atmungsfrequenz in Ruhe (linke Grafik, n. s.) und Differenz der Atmungsfrequenz zwischen Belastungsende und Ruhe (rechte Grafik, n. s.) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

Kälber mit **latenter** und **fraglicher** respiratorischer Insuffizienz reagierten auf die motorische Belastung wie die Referenzgruppe und auch in Ruhe traten keine statistisch signifikanten Abweichungen auf (Abb. 24).

4.5.2. Atemzugvolumen

Unter körperlicher Belastung zeigte sich bei den Belastungstests des Status **Ia** ein statistisch signifikanter Anstieg des Atemzugvolumens (**V_t**; Wilcoxon-Test: P = 0,012) um 12,5 % (-2,1 % - 42,7 %) von 669 ± 110 ml (12,93 ± 1,39 ml/kg) in Ruhe auf 836 ± 352 ml (16,02 ± 6,10 ml/kg) am Belastungsende, obwohl bei 7 der 27 Belastungstests ein Abfall registriert wurde (Abb. 25).

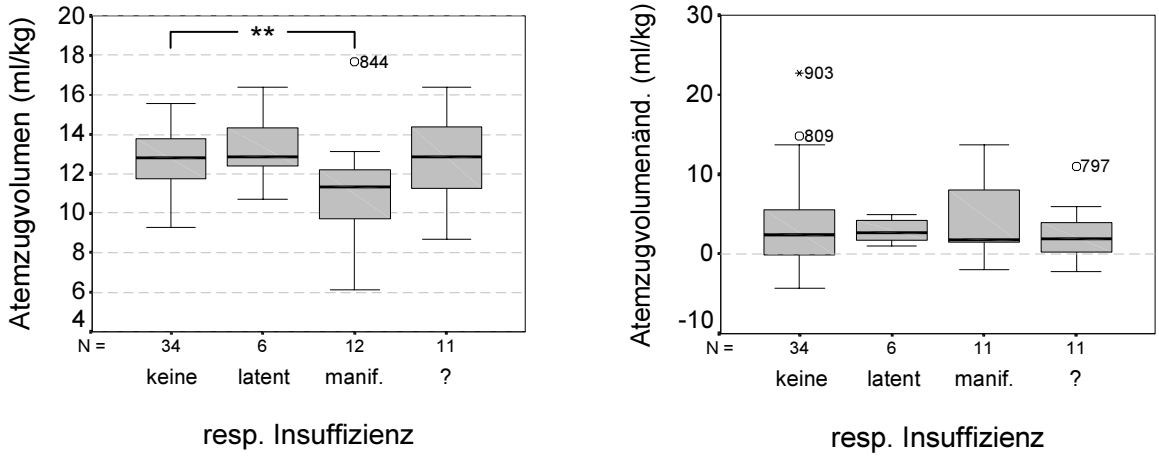

*Abb. 25: Atemzugvolumen (ml/kg) in Ruhe (linke Grafik, **U-Test: P = 0,009) und Änderung des Atemzugvolumens am Belastungsende (rechte Grafik, n. s.) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.*

Nach ein bis drei Minuten Erholung wurden die V_t-Ruhewerte wieder erreicht und änderten sich bis 30 min nach Belastungsende nicht mehr. Die Kälber **809** und **903** zeigten in der

Belastunggstufe A und Kalb **797** in der Belastungsstufe B einen überdurchschnittlich starken Anstieg (von 14,74; 12,42 bzw. 15,58 ml/kg in Ruhe auf 29,50; 35,10 bzw. 29,28 ml/kg am Belastungsende) und o. g. Kalb **809** erreichte erst nach 15 min Erholung wieder das Ruheniveau.

Alle sechs Kälber mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz wiesen am Belastungsende einen statistisch signifikanten Anstieg von V_t (Wilcoxon-Test: P = 0,028) um 1.03 bis 4,91 ml/kg auf (Abb. 25).

Einen mit 11,23 ± 2,78 ml/kg signifikant niedrigeren Ruhewert des V_t als die Referenzgruppe (Mann-Whitney-Test: P = 0,009) zeigten die Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz (Abb. 25). Nur die beiden Kälber des Status **VI** reagierten auf die Belastung mit einem geringgradigen Abfall des V_t, alle anderen mit einem Anstieg.

4.5.3. Atemminutenvolumen

Da in der Statusgruppe **Ia** ein Anstieg von f_R und V_t beobachtet wurde, stieg bei diesen Tieren erwartungsgemäß auch das Atemminutenvolumen (**V_{min}**) unter motorischer Belastung an. Dieser Anstieg von 25,86 ± 6,68 l/min (0,50 ± 0,14 l/min/kg) in Ruhe auf 42,80 ± 12,98 l/min (0,84 ± 0,27 l/min/kg) am Belastungsende bzw. um 58,2 % (43,9 % - 72,5 %) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001). Drei Minuten nach Belastungsende wurden die Ruhe-Ausgangswerte wieder erreicht (Abb. 26).

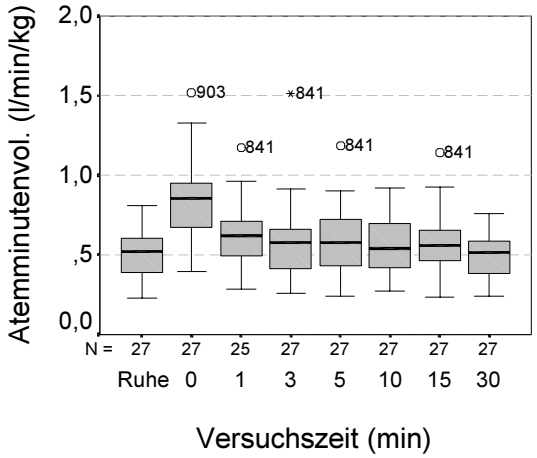

Abb. 26: Verläufe des Atemminutenvolumens (in Bezug zur Körpermasse) vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppe Ia. Der Anstieg vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

Bei den Belastungstests der Statusgruppen **Ib – VII** traten sowohl in Ruhe als auch nach der ergometrischen Belastung keineAbweichungen von dem Verlauf der Referenzgruppe Ia auf (Abb. 27).

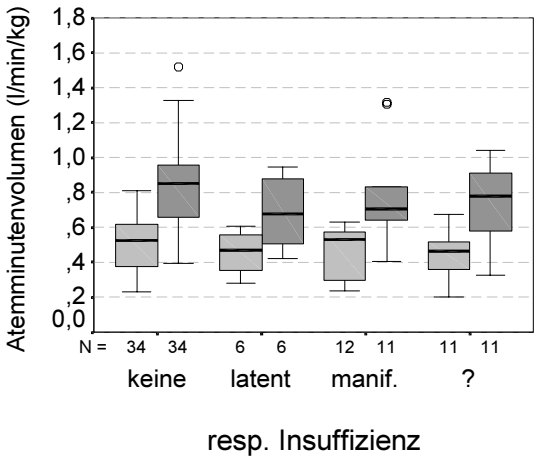

Abb. 27: Atemminutenvolumen (in Bezug zur Körpermasse) in Ruhe (mittelgraue Boxplots) und am Belastungsende (dunkelgraue Boxplots) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz. Der Anstieg zum Belastungsende war in allen Gruppen statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,05).

4.5.4. Atmungszeitquotient

Bis auf 2 der 27 Belastungstests des Status **Ia** reagierten alle Kälber auf die Laufbandarbeit mit einem Abfall des Atmungszeitquotienten (**t_E/t_I**) um 0,2 ± 0,15. Dieser Abfall war statistisch signifikant **(**Wilcoxon-Test: P < 0,001). Nach ein bis drei Minuten Erholung wurde das Ruhe-Niveau wieder eingenommen (Abb. 28).

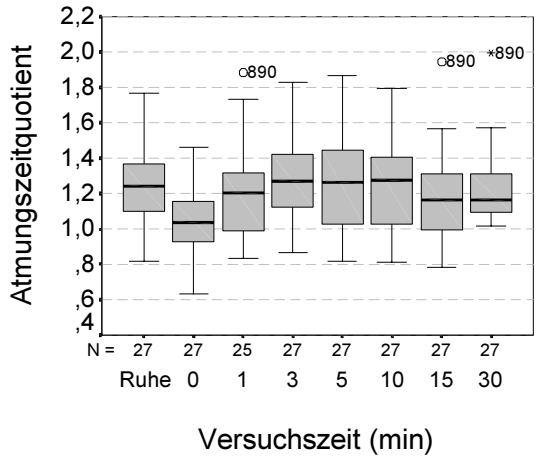

Abb. 28: Atmungszeitquotient in Ruhe und nach der motorischen Belastung bei den Belastungstests des Status Ia. Der Abfall vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

Kälber, die anhand des P_{a,O_2}–Verlaufs Symptome einer **latenten** bzw. **manifesten** respiratorischen Insuffizienz zeigten, wiesen einen nicht-signifikant niedrigeren Ruhe-Atmungszeitquotienten als die Referenzgruppe auf . Nur einige dieser Kälber reagierten auf die motorische Belastung mit einem (auch nur geringgradigen) Abfall des t_E/t_I (Abb. 29). Beide Kälber des Status **VI** wiesen einen geringgradigen Anstieg des t_E/t_I am Belastungsende auf.

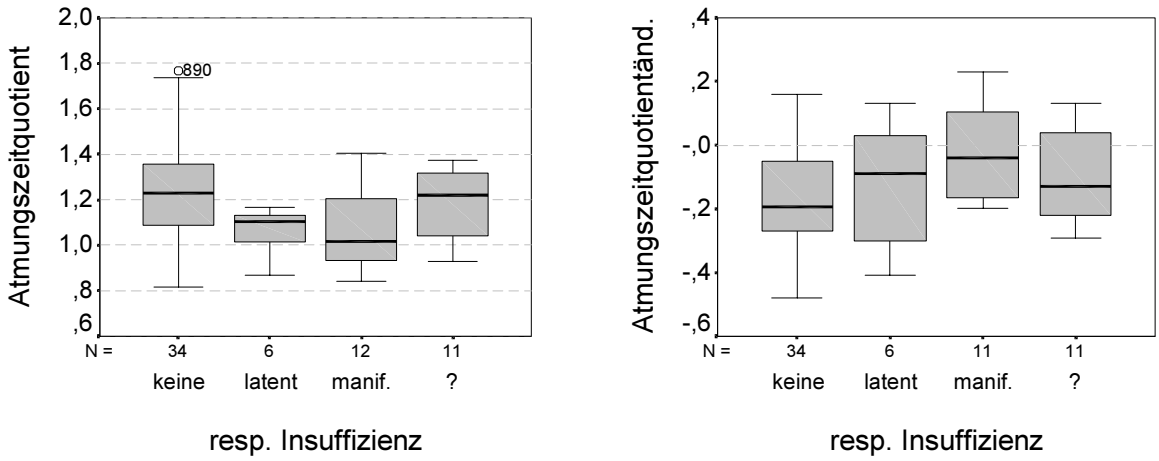

Abb. 29: Atmungszeitquotient in Ruhe (linke Grafik, n. s.) und Differenz des Atmungszeitquotienten zwischen Belastungsende und Ruhe (rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

4.5.5. Dynamische Compliance

Alle Kälber des Status **Ia** (außer Kalb-Nr. 809 in der Belastungsstufe A) zeigten am Belastungsende einen Abfall der Dynamischen Compliance (**C_{dyn}**) von 0,46 ± 0,09 l/kPa in Ruhe auf 0,40 ± 0,12 l/kPa. Dieser Änderung war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: $P < 0{,}001$). Drei Minuten nach Belastungsende wurden die individuellen Ruhe-Ausgangswerte wieder erreicht und änderten sich bis 30 min nach Belastungsende nicht mehr (Abb. 30).

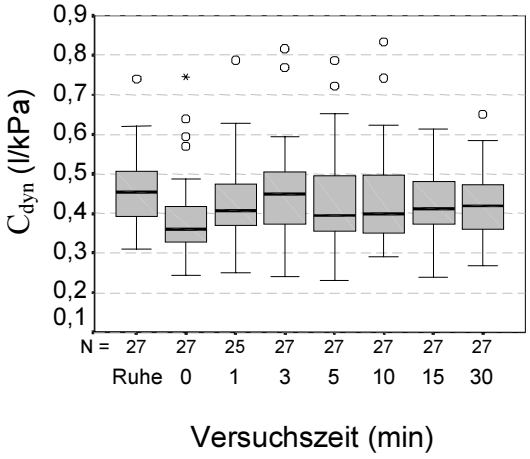

Abb. 30: Dynamische Compliance in Ruhe und nach Belastung bei den Belastungstests des Status Ia. Der Abfall vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: $P < 0{,}001$).

Die sieben Kälber des Status **Ib** wiesen mit 0,41 ± 0,1 l/kPa (nicht-signifikant) niedrigere Ruhewerte als die Referenzgruppe auf und reagierten auf die motorische Belastung nicht einheitlich: Bei vier Belastungstests wurde am Belastungsende ein Abfall registriert, bei zwei Tests keine Veränderung und bei Kalb-Nr. **800** ein Anstieg von C_{dyn}.

Fünf der sechs Kälber (außer Kalb **852** des Status II), die anhand des P_{a,O_2}-Verlaufes Symptome einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz aufwiesen, reagierten ebenfalls auf die

motorische Belastung mit einem (statistisch nicht signifikanten) Abfall von C_{dyn} um 0,10 ± 0,13 l/kPa (Abb. 31).

Die Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz wiesen mit 0,31 ± 0,11 l/kPa einen statistisch signifikant niedrigeren C_{dyn}-Ruhewert als die Referenzgruppe auf (Mann-Whitney-Test: $P < 0{,}005$). In allen drei Statusgruppen trat nach der motorischen Belastung kein einheitlicher Verlauf von C_{dyn} auf (Abb. 31).

Die Kälber mit **fraglicher** respiratorischer Insuffizienz zeigten sowohl in Ruhe als auch nach der Belastung keine Abweichungen vom Verlauf der Referenzgruppe (Abb. 31).

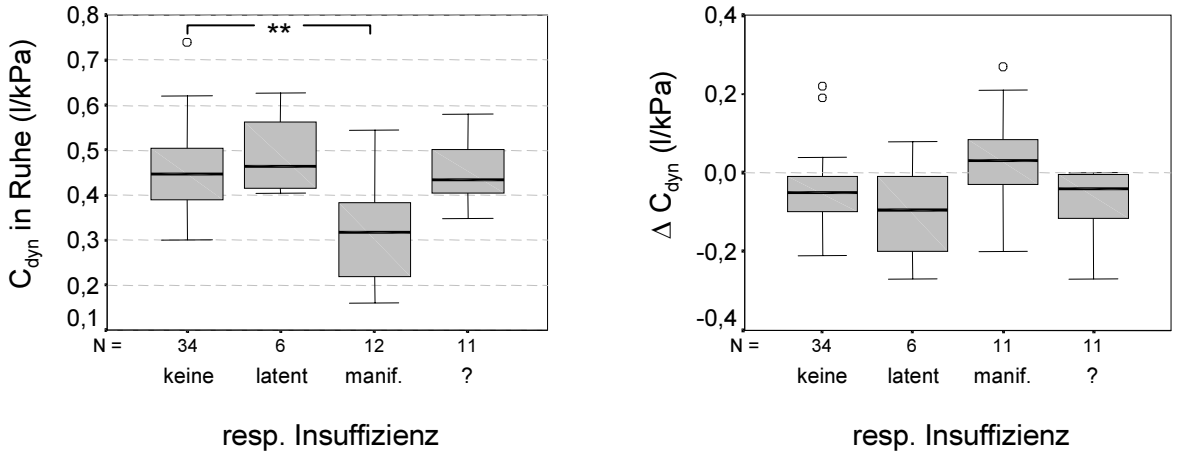

*Abb. 31: Dynamische Compliance in Ruhe (linke Grafik, ** U-Test: P < 0,005) und Änderung der dynamischen Compliance am Belastungsende (d. h. Differenz zwischen Belastungsende und Ruhe, rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.*

4.5.6. Maximale intraoesophageale Druckdifferenz

Die maximale intraoesophageale Druckdifferenz ($\Delta P_{oes,max}$) zeigte am Belastungsende bei 62 (von 63) Belastungstests (außer bei Kalb 798 der Statusgruppe VI) einen Anstieg. Der Median der $\Delta P_{oes,max}$-Änderung betrug 0,54 kPa (0,29 – 1,01 kPa) (Abb. 32). Dieser Anstieg war bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester und fraglicher respiratorischer Insuffizienz statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: $P < 0{,}05$). Nach 3 min Erholung wurde das individuelle Ruhe-Niveau vom Testbeginn wieder erreicht und änderte sich dann bis 30 min nach der Belastung nicht mehr.

Die Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz wiesen mit 1,78 ± 0,34 kPa einen statistisch signifikant höheren $\Delta P_{oes,max}$-Ruhewert als die Referenzgruppe **Ia** mit 1,48 ± 0,20 kPa auf (Mann-Whitney-Test: $P = 0{,}020$; Abb. 32).

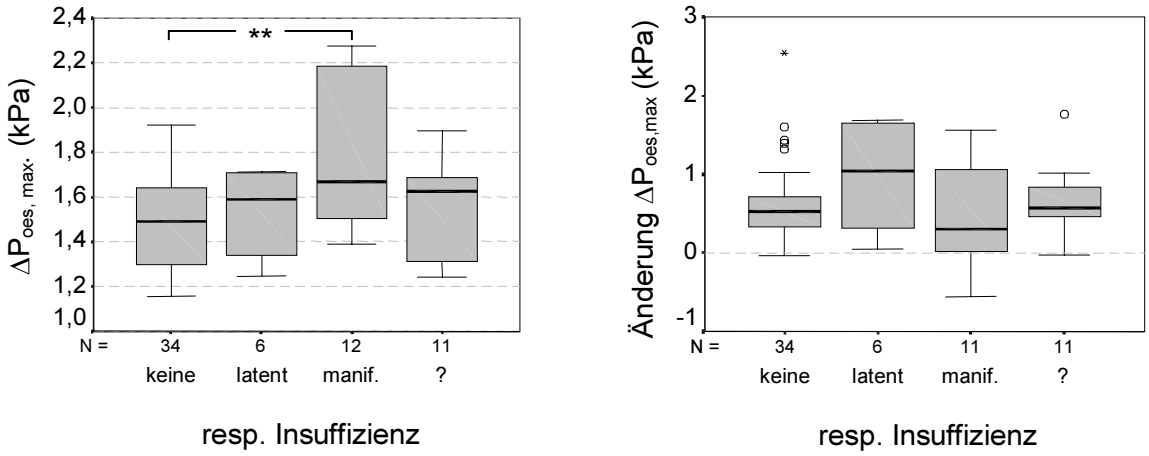

*Abb. 32: Maximale intraoesophageale Druckdifferenz in Ruhe (linke Grafik, **U-Test: P = 0,02) und Änderung der maximalen intraoesophagealen Druckdifferenz am Belastungsende (d. h. Differenz zwischen Belastungsende und Ruhe, rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.*

4.5.7. Totale pulmonale Resistance

Die Ruhewerte der totalen pulmonalen Resistance (**R_L**) der Kälber des Status **Ia** lagen im Bereich von 0,07 – 0,71 kPa/(l/s) (0,33 ± 0,19 kPa(l/s)). Sowohl am Belastungsende als auch in der anschließenden Erholungsphase traten keine einheitlichen Veränderungen von R_L auf. Alle nach der Belastung ermittelten Werte lagen innerhalb des oben angegebenen Ruhebereichs.

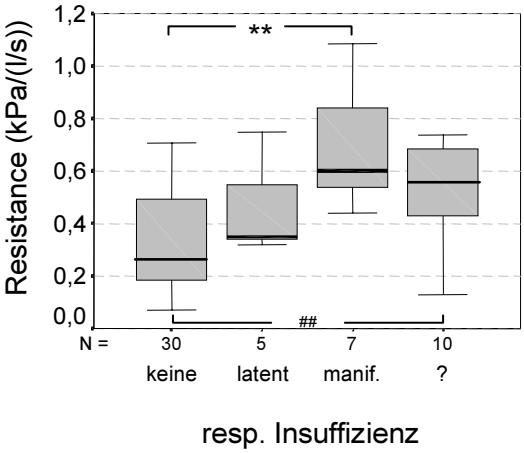

*Abb. 33: Totale pulmonale Resistance in Ruhe bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz (U-Test: ##P = 0,026 bzw. **P < 0,001).*

Die Kälber mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz zeigten weder in Ruhe noch nach der Belastung Abweichungen vom R_L-Verlauf der Referenzgruppe (Abb. 33, Abb. 34).

Die Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz wiesen mit 0,70 ± 0,24 kPa /l/s einen statistisch signifikant höheren R_L-Ruhewert als die Referenzgruppe auf (Mann-Whitney-Test: P = 0,001) und zeigten am Belastungsende einen tendenziellen Abfall um 0,23 ± 0,30 kPa/(l/s), der auch nach 30 Minuten Erholung noch registriert werden konnte (Abb. 33, Abb. 34).

Auch die R_L-Ruhewerte der Kälber mit **fraglicher** respiratorischer Insuffizienz waren mit 0,51 ± 0,22, kPa(/l/s) statistisch signifikant höher als die der Referenzgruppe (P = 0,026).

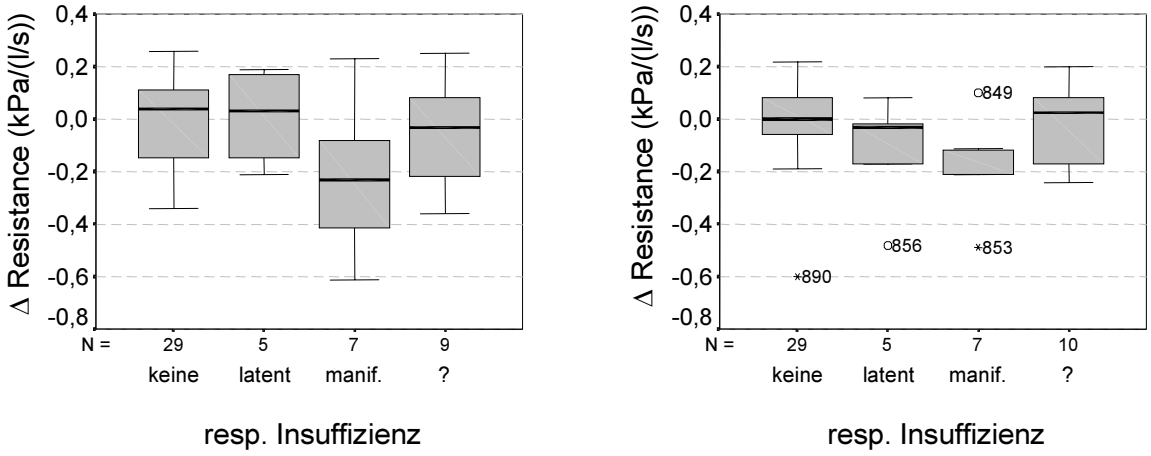

Abb. 34: Änderung der totalen pulmonalen Resistance am Belastungsende (Differenz zum Ruhewert, linke Grafik) und nach 30 Minuten Erholung (rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

4.6. Blutgase

4.6.1. Sauerstoffpartialdruck

- arteriell

Die Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdruckes ($\mathbf{P_{a,\,O_2}}$) vor und bis 30 min nach Belastung waren Grundlage für die Zuordnung der Belastungstests zu den sieben Statusgruppen entsprechend Abschnitt 4.2. In diesem Abschnitt können alle Einzeltier-Verläufe innerhalb der jeweiligen Statusgruppe nachvollzogen werden.

Wie in Abb. 35 verdeutlicht, wurde bei den in die Statusgruppe **Ia** eingeordneten Belastungstests ein statistisch gesicherter Anstieg des $P_{a,\,O_2}$ von 12,3 ± 0,5 kPa in Ruhe auf 12,8 ± 0,5 kPa am Belastungsende ermittelt (Wilcoxon-Test: P = 0,001).

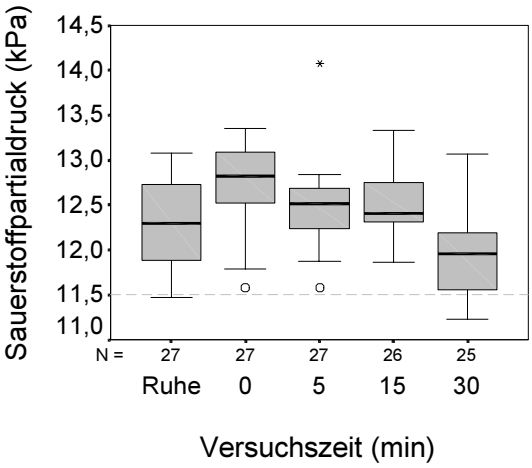

Abb. 35: Verläufe des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppe Ia. Der Anstieg vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P = 0,001).

5 und 15 min nach Belastungsende betrugen die P_{a,O_2}–Werte noch 12,5 ± 0,4 kPa. 30 min nach Belastungsende waren die P_{a,O_2}–Werte mit 12,0 ± 0,5 kPa statistisch signifikant niedriger als die Ruhe-Ausgangswerte (Wilcoxon-Test: P = 0,010).
Die Kälber mit Symptomen einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz wiesen mit 11,7 ± 0,22 kPa statistisch signifikant niedrigere P_{a,O_2}-Ruhewerte auf als die der Referenzgruppe Ia (Mann-Whitney-Test: P = 0,003). Sowohl für die Statusgruppe I als auch für die Statusgruppen II und III galten jedoch P_{a,O_2}-Ruhewerte > 11,5 kPa als Zuordungskriterium. Der P_{a,O_2}-Abfall nach der motorischen Belastung war nicht einheitlich (Abb. 36). Bei den Belastungstests des Status **II** wurde das P_{a,O_2}-Minimum nach 30 min erreicht, beim Status **III** hingegen waren die Ruhewerte zu diesem Zeitpunkt – nach einem P_{a,O_2}-Abfall am Belastungsende – schon wieder erreicht worden (Abb. 7, Abb. 8).

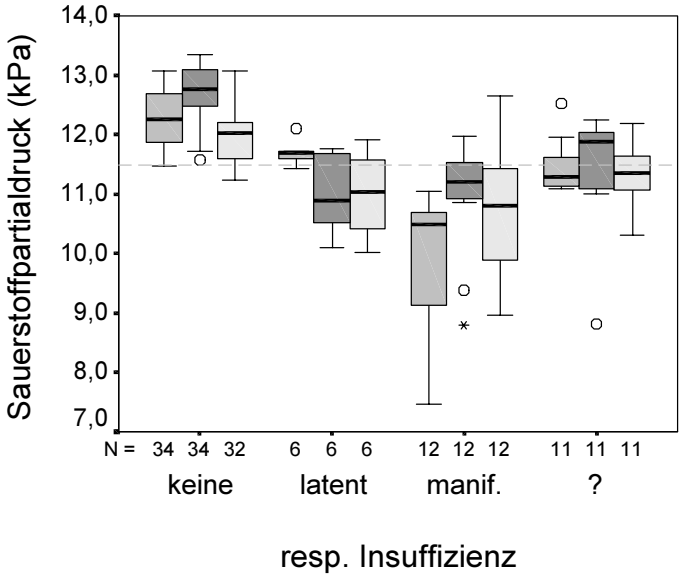

Abb. 36: Arterieller Sauerstoffpartialdruck in Ruhe (mittelgraue Boxplots), bei Belastungsende (dunkelgraue Boxplots) sowie 30 min nach der Belastung (hellgraue Boxplots) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz (Statistik siehe Text).

Auch bei den Kälbern mit einer **manifesten** respiratorischen Insuffizienz lagen die P_{a,O_2}–Ruhewerte mit 9,94 ± 1,13 kPa statistisch signifikant niedriger als die der Referenzgruppe (Mann-Whitney-Test: P < 0,001) und als die der Kälber mit latenter respiratorischer Insuffizienz (Mann-Whitney-Test: P = 0,001). Bei allen 12 Belastungstests reagierten die Kälber am Belastungsende mit einem P_{a,O_2}-Anstieg (Abb. 36); dieser Anstieg war statistisch signifikant (Wilcoxon–Test: P = 0,002). Bei den Kälbern der Statusgruppen **IV** und **VI** wurden 30 min nach Belastungsende deutlich höhere P_{a,O_2}-Werte als die Ruhe-Ausgangswerte gemessen, bei der Statusgruppe **V** wurden die Ruhewerte wieder eingenommen (Abb. 9 - Abb. 11).
Bei den 11 Belastungstests, bei denen anhand des P_{a,O_2}–Verlaufs eine Zuordnung zu den Formen der respiratorischen Insuffizienz **fraglich** erschien, waren die P_{a,O_2}–Ruhewerte mit

11,48 ± 0,45 kPa ebenfalls statistisch signifikant niedriger als die der Referenzgruppe (Mann-Whitney-Test: $P < 0{,}001$; Abb. 36). Die $P_{a,\,O_2}$–Verläufe nach der motorischen Belastung waren nicht einheitlich: So wurde am Belastungsende bzw. 5 min nach Belastung bei 5 Belastungstests ein geringgradiger Anstieg des $P_{a,\,O_2}$ registriert, bei 6 Tests ein Abfall, wobei dieser $P_{a,\,O_2}$–Abfall nur bei Kalb Nr. **844** mit der Belastungstufe C (Untergruppe b) hochgradig war (Abb. 12). 15 min nach Belastungsende wurden die Ruhewerte wieder erreicht, bei o. g. Kalb **844** nach 30 min Erholung.

- gemischt-venös

Die Verläufe des gemischt-venösen Sauerstoffpartialdrucks (**$P_{\bar{v},\,O_2}$**) der Statusgruppe **Ia** waren nach der ergometrischen Belastung nicht einheitlich. So trat bei 15 Belastungstests direkt am Belastungsende ein geringgradiger Anstieg des $P_{\bar{v},\,O_2}$ auf, bei 11 ein Abfall. Mit einem mittleren Anstieg von 0,17 ± 0,27 kPa wurde 5 min nach Belastungsende die maximale Abweichung von dem Ruhe- $P_{\bar{v},\,O_2}$von 4,58 ± 0,53 kPa erreicht (Abb. 37). Die Spannweite der $P_{\bar{v},\,O_2}$-Werte während der motorischen Belastungen lag im Bereich von 3,03 bis 5,84 kPa; die maximale Abweichung vom Ruhewert während eines einzelnen Belastungstests betrug 0,89 kPa (nach 5 min Erholung).

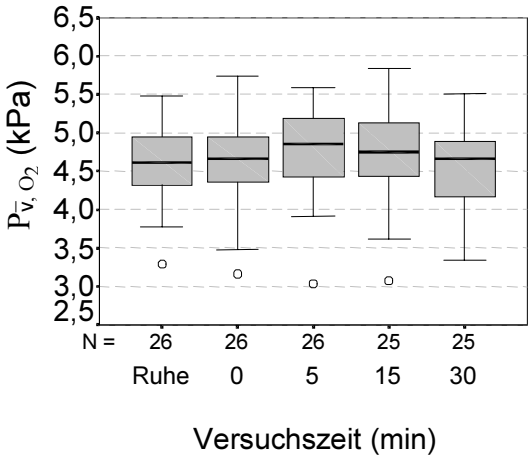

Abb. 37: Verläufe des gemischt-venösen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei allen Belastungstests der Statusgruppe Ia (n. s.).

Entsprechend den Angaben aus der Literatur (Tab. 5) wurden $P_{\bar{v},\,O_2}$-Werte < 4 kPa als hypoxämisch angesehen. Bei drei Kälbern der Statusgruppe Ia trat - bei arterieller Normoxämie - eine gemischt-venöse Hypoxämie auf (Abb. 38).

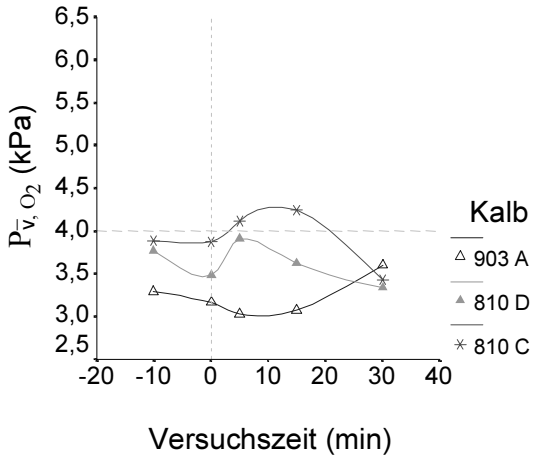

Abb. 38: Verläufe des gemischt-venösen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei drei Kälbern der Statusgruppe Ia mit gemischt-venöser Hypoxämie.

Bei den Kälbern mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz entsprachen die $P_{\bar{v}, O_2}$-Ruhewerte mit 4,55 ± 0,33 kPa denen der Referenzgruppe und nur Kalb Nr. **853** des Status **II** wies mit 3,81 kPa eine gemischt-venöse Hypoxämie in Ruhe auf (Abb. 39). Die $P_{\bar{v}, O_2}$-Verläufe waren innerhalb der jeweiligen Statusgruppe annähernd parallel zum Verlauf des $P_{\bar{v}, O_2}$, und zeigten somit nach der Laufbandarbeit einen Abfall, der auch 30 min nach Belastungsende noch registriert werden konnte (Abb. 39). Nur o. g. Kalb Nr **853** reagierte auf die Belastung mit einem $P_{\bar{v}, O_2}$-Anstieg. Auch nach der Belastung lagen die $P_{\bar{v}, O_2}$-Werte im normoxämischen Bereich, nur Kalb Nr. **804** des Status **II** wies 30 min nach Belastungsende einen $P_{\bar{v}, O_2}$-Wert von 3,57 kPa auf.

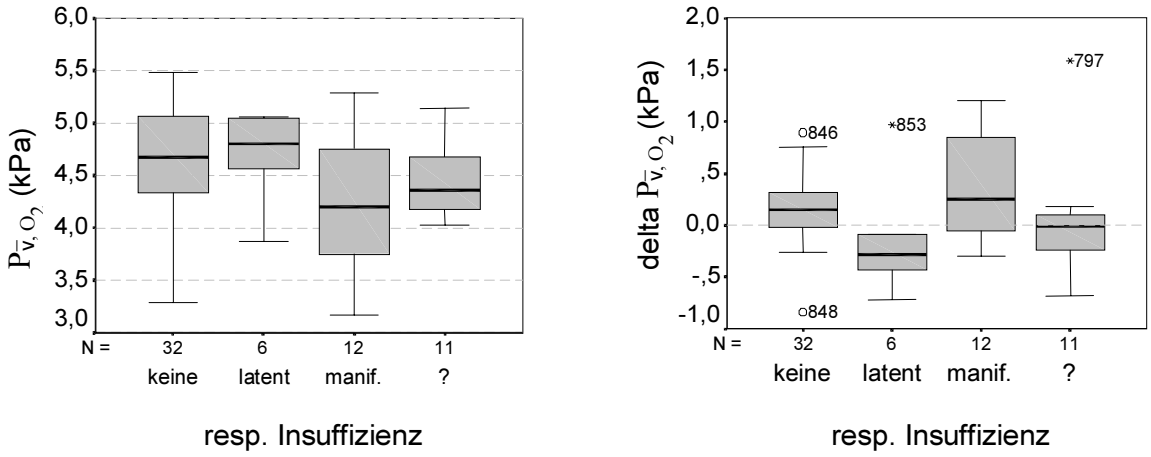

Abb. 39: Gemischt-venöser Sauerstoffpartialdruck in Ruhe (linke Grafik) sowie Änderung des gemischt-venösen Sauerstoffpartialdrucks 5 min nach Belastungsende (Differenz zum Ruhewert, rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

Die Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz wiesen mit 4,19 ± 0,65 kPa statistisch signifikant niedrigere Ruhewerte als die Referenzgruppe auf (Abb. 39; Mann-Whitney-Test: P = 0,035). Nur bei den motorischen Belastungen der Statusgruppen **IV** und **VI** traten gemischt-venöse Hypoxämien auf (Abb. 40). Bei der Statusgruppe **V** zeigten sich

untereinander parallele $P_{\bar{v}, O_2}$- Verläufe im normoxämischen Bereich: Anstieg von einem Ruhe $P_{\bar{v}, O_2}$ von 4,53 ± 0,60 kPa auf 5,09 ± 0,69 kPa 5 min nach Belastungsende und Rückkehr zu den Ruhe-Ausgangwerten 30 min nach Belastungsende.

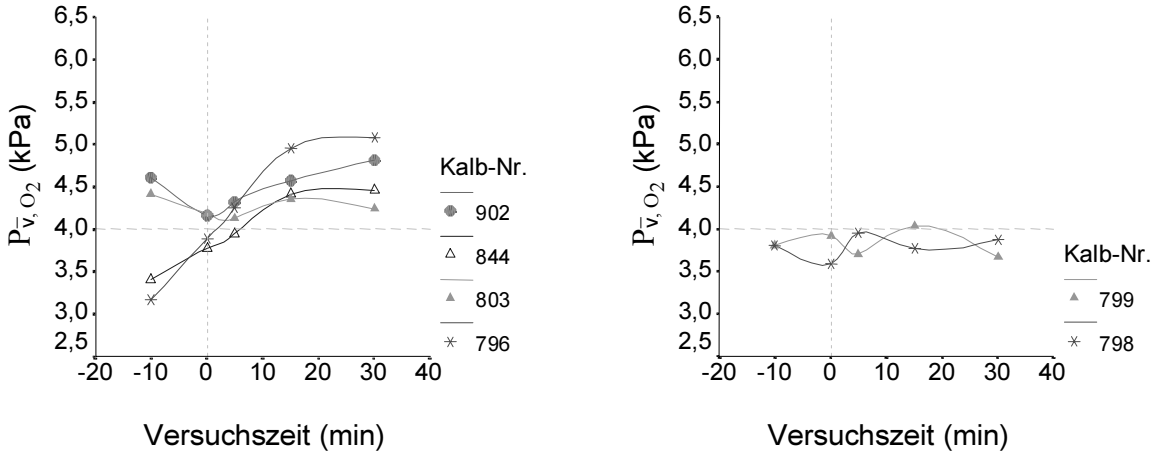

Abb. 40: Verläufe des gemischt-venösen Sauerstoffpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppe IV (linke Grafik) und VI (rechte Grafik).

4.6.2. Kohlendioxidpartialdruck

- arteriell

Die Belastungstests der Statusgruppe **Ia** (normoxämisches P_{a, O_2}-Niveau, klinisch gesund), deren erfasste Parameter als Referenzbereich herangezogen wurden, zeigten einen arteriellen Kohlendioxidpartialdruck (**P_{a, CO_2}**) in Ruhe von 6,6 ± 0,3 kPa. Diese Werte änderten sich bis 30 min nach Belastung nicht signifikant. Die mittlere Abweichung vom Ruhewert erreichte ihr Maximum von 0,1 ± 0,2 kPa nach 30 min (Abb. 41).

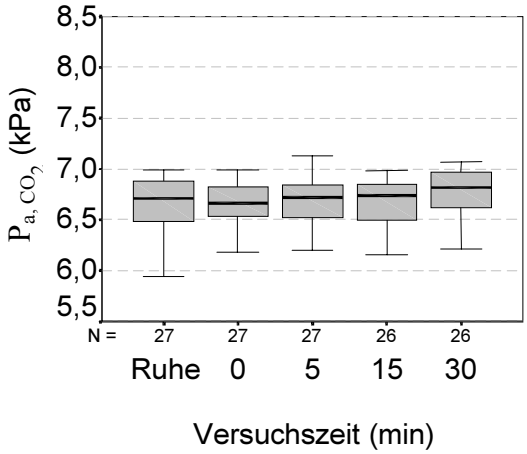

Abb. 41: Verläufe des arteriellen Kohlendioxidpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei allen Kälbern der Statusgruppe Ia (n. s.).

Aufgrund dieser Werte wurde ein P_{a, CO_2} > 7,0 kPa für die hier realisierten Versuchsbedingungen als Hyperkapnie angesehen. Werte unter 6,0 kPa wären als hypokapnisch eingestuft worden, traten aber nur einmal und nur grenzwertig auf. Im

Folgenden als normokapnisch bezeichnete $P_{a,\,CO_2}$–Verläufe hatten demzufolge Werte von 6,0 bis 7,0 kPa.

Die Mehrzahl der Kälber (92 %), die während der motorischen Belastungen **keine** oder Anzeichen einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz zeigten, hatten einen Ruhewert des $P_{a,\,CO_2} < 7{,}0$ kPa. Während sich dieser Befund bei den normoxämischen Tieren auch bis 30 min nach Belastungsende nicht änderte, stieg der $P_{a,\,CO_2}$ bei den latent respiratorisch insuffizienten Tieren von $6{,}9 \pm 0{,}3$ kPa auf $7{,}1 \pm 0{,}4$ kPa tendenziell an ($P = 0{,}3$). Die **manifest** erkrankten Tiere hatten bereits Ruhewerte des $P_{a,\,CO_2}$ in einem weiteren Streubereich, die sich generell auch unter Belastung nicht änderten (Abb. 42). Im Folgenden sollen nur Abweichungen vom normokapnischen Verlauf oder Besonderheiten bei Tieren der einzelnen Statusgruppen dargestellt werden.

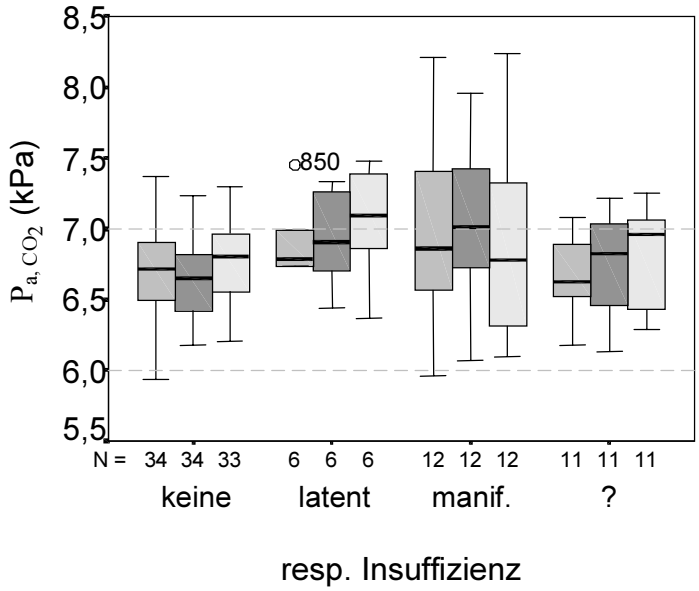

Abb. 42: Arterieller Kohlendioxidpartialdruck ($P_{a,\,CO_2}$) in Ruhe (mittelgraue Boxplots), bei Belastungsende (dunkelgraue Boxplots) sowie 30 min nach der Belastung (hellgraue Boxplots) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz (Statistik siehe Text).

Bei den 7 motorischen Belastungen der Statusgruppe **Ib** zeigten die Kälber **846** und **852** einen hyperkapnischen Verlauf (Abb. 43). Ein ähnliches Bild wies Kalb **850** der Statusgruppe **III** auf (Abb. 43).

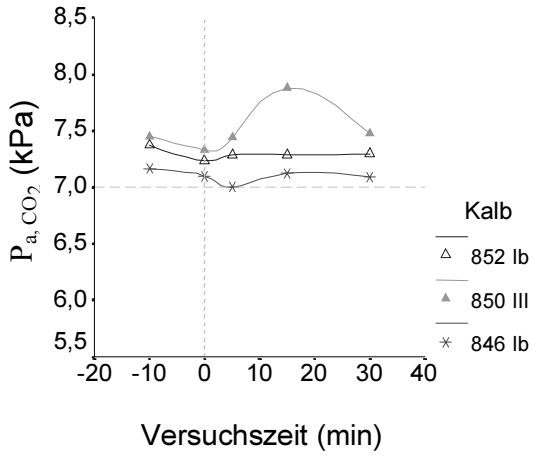

Abb. 43: Verläufe des arteriellen Kohlendioxidpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Kälbern mit normoxämischem Ruhewert und Hyperkapnie.

Bei den 3 Kälbern mit einem $P_{a,\,O_2}$ – Abfall nach dem motorischen Belastungtests (Status **II**) stieg der $P_{a,\,CO_2}$ von einem Ruhewert von 6,8 ± 0,0 kPa an (Abb. 44). Dabei wurden von 2 Kälbern (**804** und **852**) 30 min nach der Belastung $P_{a,\,CO_2}$– Werte > 7,0 kPa erreicht (**latente Globalinsuffizienz**), während bei Kalb **853** der $P_{a,\,CO_2}$ zu diesem Zeitpunkt 6,9 kPa betrug (**latente Partialinsuffizienz**).

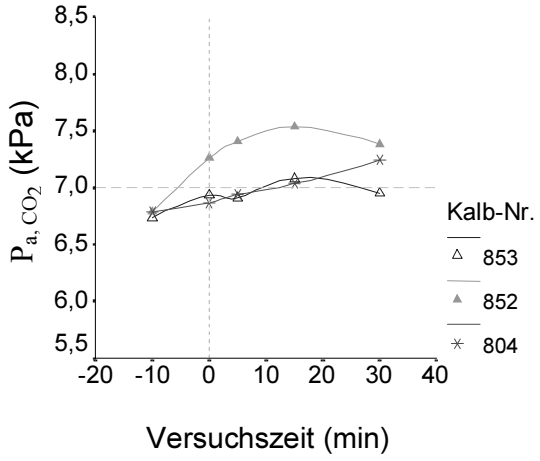

Abb. 44: Verläufe des arteriellen Kohlendioxidpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Kälbern des Status II ($P_{a,\,O_2}$ – Abfall).

Bei den 12 Kälbern mit einer **manifesten** respiratorischen Insuffizienz wiesen 3 Kälber der Statusgruppe **V** (**846, 849** und **853**) sowie Kalb **798** der Statusgruppe **VI** einen hyperkapnischen Verlauf auf (Abb. 45, **manifeste Globalinsuffizienz**).

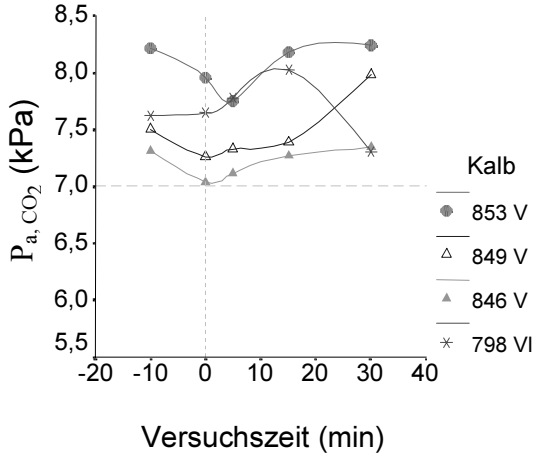

Abb. 45: Verläufe des arteriellen Kohlendioxidpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Kälbern mit hypoxämischem Ruhewert und Hyperkapnie (manifeste Globalinsuffizienz).

Ein normokapnischer Verlauf wurde demzufolge bei 32 der 34 motorischen Belastungen bei Kälbern ohne Anzeichen einer respiratorischer Insuffizienz, bei 3 der 6 motorischen Belastungen bei Kälbern mit latenter respiratorischer Insuffizienz, bei 8 der 12 motorischen Belastungen bei Kälbern mit manifester respiratorischen Insuffizienz sowie bei 9 der 11 Kälber mit fraglicher respiratorischer Insuffizienz (außer die Kälber 850 und 856 der Untergruppe b) beobachtet.

- gemischt-venös

Die Belastungstests der Statusgruppe **Ia** wiesen andeutungsweise einen Anstieg des gemischt-venösen Kohlendioxidpartialdrucks (**$P_{\bar{v}, CO_2}$**) von einem Ruhe-$P_{\bar{v}, CO_2}$ von 7,72 ± 0,32 kPa auf 7,85 ± 0,36 kPa am Belastungsende auf (P = 0,08; Abb. 46). Dabei wurde bei 16 Tests am Ende der motorischen Belastung ein Anstieg des $P_{\bar{v}, CO_2}$ beobachtet, bei 10 Tests ein Abfall. Die Spannweite der $P_{\bar{v}, CO_2}$–Werte im gesamten Versuchszeitraum lag im Bereich von 6,90 bis 8,86 kPa, die maximale Abweichung vom Ruhewert innerhalb eines Belastungstets betrug 0,83 kPa. $P_{\bar{v}, CO_2}$–Werte > 8,5 kPa werden für die hier realisierten Versuchsbedingungen als gemischt-venöse Hyperkapnie angesehen.

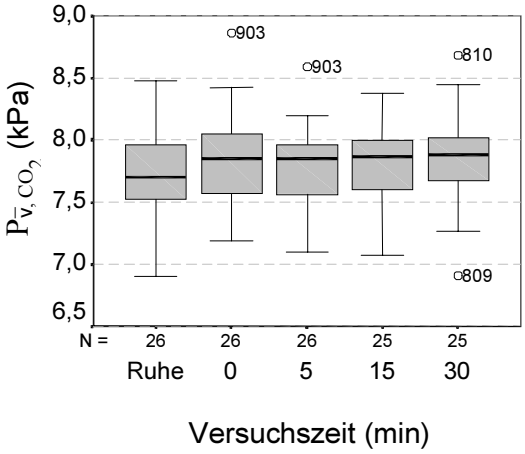

Abb. 46: Verläufe des gemischt-venösen Kohlendioxidpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei allen Kälbern der Statusgruppe Ia (klinisch gesund, normoxämischer P_{a, O_2}–Verlauf).

Zwei der drei Kälber der Statusgruppe **Ia** mit einer gemischt-venösen Hypoxämie (*Abb. 38*) zeigten mit Maximalwerten von 8,68 kPa 30 min nach Belastungsende (Kalb **810**, Belastung D) und 8,86 kPa am Belastungsende (Kalb **903**, Belastung A) auch Anzeichen einer gemischt-venösen Hyperkapnie.

Von den 6 erfassten Tieren der Statusgruppe **Ib** zeigte nur das Kalb Nr. **852**, welches auch eine arterielle Hyperkapnie aufwies (Abb. 43), einen gemischt-venösen hyperkapnischen Verlauf.

Bei den Kälbern mit einer **latenten** repiratorischen Insuffizienz stieg der $P_{\bar{v}, CO_2}$ von 7,89 ± 0,34 kPa in Ruhe auf 8,20 ± 0,40 kPa 30 min nach Belastungsende tendenziell an (P = 0,17; *Abb. 47*). Dabei reagierten 5 der 6 erfassten Kälber bereits am Belastungsende mit einem $P_{\bar{v}, CO_2}$-Anstieg. Die Kälber **852** (Status II) und **850** (Status III), die eine arterielle Hyperkapnie in Ruhe (Kalb 850, Abb. 43) bzw. nach der Belastung (Kalb 852, Abb. 44) zeigten, wiesen einen Anstieg des $P_{\bar{v}, CO_2}$ von Ruhewerten < 8,0 kPa auf > 8,5 kPa 15 und 30 min nach der Belastung auf.

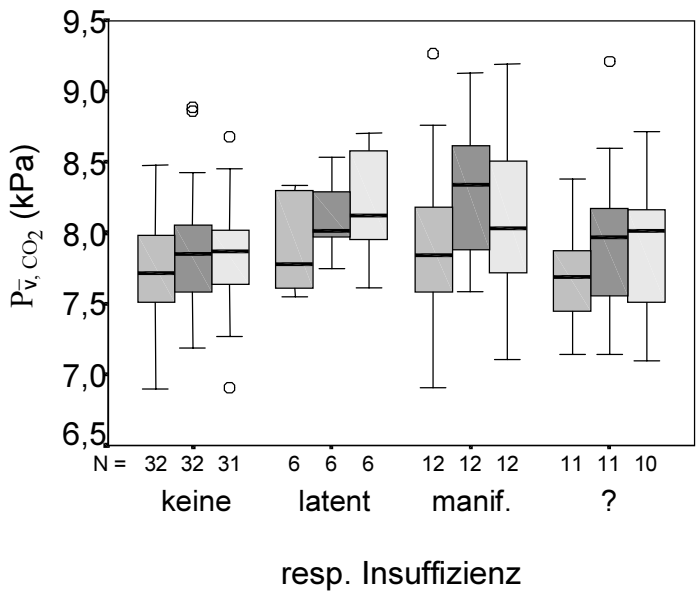

Abb. 47: Gemischt-venöser Kohlendioxidpartialdruck in Ruhe (mittelgraue Boxplots), bei Belastungsende (dunkelgraue Boxplots) sowie 30 min nach der Belastung (hellgraue Boxplots) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester sowie fraglicher respiratorischer Insuffizienz (Statistik siehe Text).

Die motorische Belastung führte bei den Kälbern mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz zu einem Anstieg des $P_{\bar{v}, CO_2}$ von 7,94 ± 0,62 kPa in Ruhe auf 8,31 ± 0,48 kPa am Belastungsende (*Abb. 47*). Dieser Anstieg war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P = 0,004) und nur Kalb **853** (Status V) der manifest erkrankten Tiere reagierte auf die Laufbandarbeit mit einem Abfall des $P_{\bar{v}, CO_2}$ am Belastungsende (Abb. 48). Die $P_{\bar{v}, CO_2}$–Verläufe der Statusgruppe **IV** waren einheitlich: Anstieg von einem Ruhewert von 7,92 ± 0,22 kPa um 0,30 ± 0,21 kPa direkt nach Belastungsende und dann kontinuierlicher Abfall auf 7,55 ± 0,32 kPa 30 min nach der Belastung. Auch die $P_{\bar{v}, CO_2}$–Verläufe der Statusgruppe **V** zeigten außer bei o. g. Kalb Nr. 853 ein einheitliches Bild: Anstieg von einem Ruhewert von 7,74 ± 0,31 kPa um 0,28 ± 0,10 kPa nach Belastungsende, geringgradiger Abfall bei 5 min und dann kontinuierlicher Anstieg auf 8,26 ± 0,46 kPa 30 min nach der Belastung. Nur bei Kalb Nr. **849** des Status V wurden 30 min nach der Belastung $P_{\bar{v}, CO_2}$–Werte > 8,5 kPa festgestellt. Die hyperkapnischen $P_{\bar{v}, CO_2}$–Verläufe der beiden motorischen Belastungen der Statusgruppe **VI** zeigt Abb. 48.

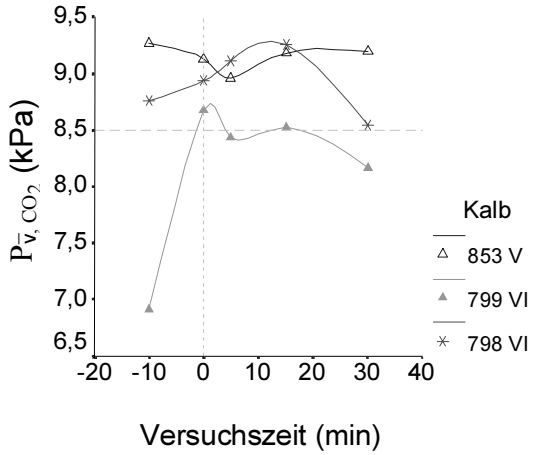

Abb. 48: Verläufe des gemischt-venösen Kohlendioxidpartialdrucks vor und nach der motorischen Belastung bei Kalb Nr. 853 (Status V), 798 und 799 (Status VI).

4.6.3. Sauerstoffsättigung

- arteriell

Bei den Kälbern der Statusgruppe **Ia** zeigte sich am Ende der motorischen Belastung ein Anstieg der arteriellen Sauerstoffsättigung (**S_{a,O_2}**) von einem Ruhe-S_{a,O_2} von 96,68 ± 0,58 % um 0,24 ± 0,56 %. Dieser Anstieg war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P = 0,031), obwohl bei 8 der durchgeführten 27 Belastungstests ein Abfall registriert wurde. Schon 5 min nach Belastungsende wurden die Ruhewerte wieder erreicht und 30 min nach der Belastung trat ein Abfall um 0,51 ± 0,67 % gegenüber den Ruhewerten auf.

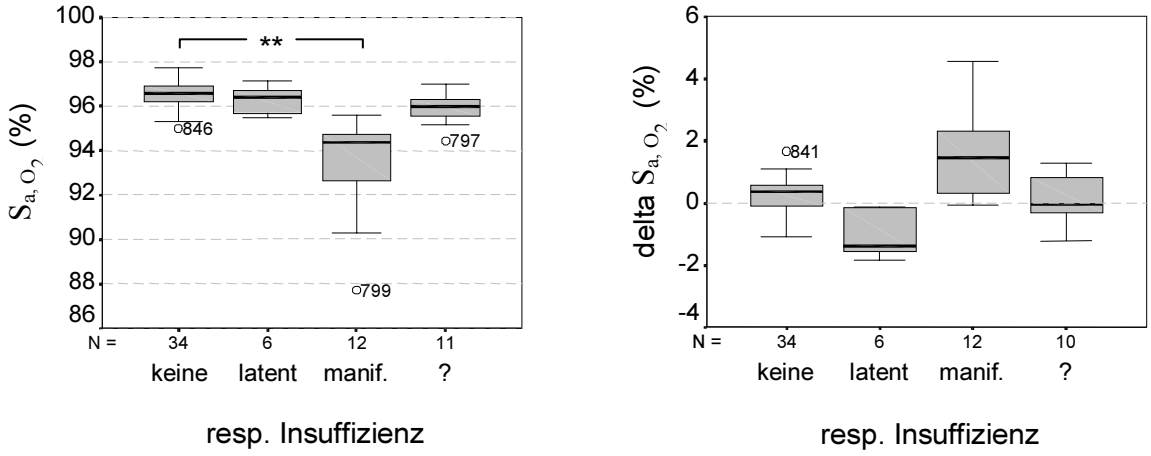

*Abb. 49: Arterielle Sauerstoffsättigung in Ruhe (linke Grafik, **U-Test: P < 0,001) und belastungsinduzierter Anstieg (d. h. Differenz der arteriellen Sauerstoffsättigung zwischen Belastungsende und Ruhe, rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.*

Bei allen Kälbern mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz wurde am Ende der Laufbandarbeit ein Abfall der S_{a,O_2}-Werte registriert (Abb. 49). Dieser Abfall war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P = 0,028). Während sich bei den Belastungstests der Statusgruppe **II** dieser S_{a,O_2}-Abfall bis 30 min nach Belastungsende fortsetzte, erlangten die Belastungstests der Statusgruppe **III** zu diesem Zeitpunkt ihre Ausgangswerte wieder.

Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz zeigten mit 93,34 ± 2,30 % signifikant niedrigere S_{a,O_2}-Ruhewerte (Mann-Whitney-Test: P < 0,001) als die Referenzgruppe Ia (Abb. 49). Unter körperlicher Arbeit wurde ein signifikanter S_{a,O_2}–Anstieg (Wilcoxon-Test: P = 0,005) beobachtet (Abb. 49). Dieser Anstieg setzte sich bei den Belastungstests der Statusgruppe **IV** bis 30 min nach Belastungsende weiter fort, sodass am Ende des Registrierzeitraumes mit 96,28 ± 0,87 % S_{a,O_2}-Werte erreicht wurden, die den Ruhewerten der Referenzgruppe entsprachen. Bei den Kälbern der Statusgruppe **V** dagegen zeigten sich am Ende des Registrierzeitraumes wieder die Ausgangswerte. Die beiden Kälber des Status **VI** zeigten mit 87,7 % bzw 90,3 % die beiden niedrigsten S_{a,O_2}-Ruhewerte und der höchste Wert nach der Belastung betrug 93,7 %.

- gemischt-venös

Die Kälber des Status **Ia** wiesen eine gemischt-venöse Sauerstoffsättigung (**$S_{\bar{v},O_2}$**) in Ruhe von 59,60 ± 8,27 % auf und zeigten am Belastungsende keinen einheitlichen $S_{\bar{v},O_2}$–Verlauf (bei 13 Belastungstests geringgradiger Anstieg und bei ebenfalls 13 ein geringgradiger Abfall). Bis 30 min nach der Laufbandarbeit wurde ein tendenzieller $S_{\bar{v},O_2}$-Abfall um 2,55 ± 6,86 % ermittelt.

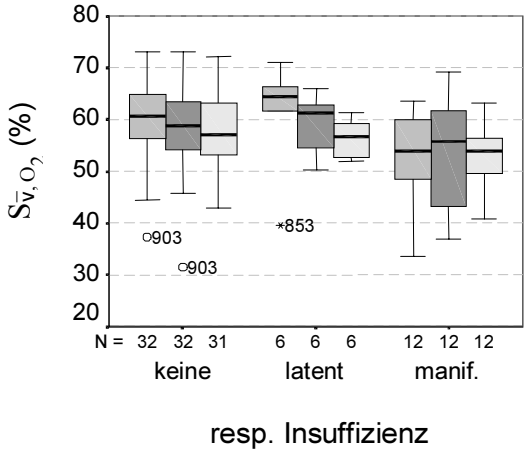

Abb. 50: gemischt-venöse Sauerstoffsättigung in Ruhe (mittelgraue Boxplots), nach Belastungsende (dunkelgraue Boxplots) sowie 30 min nach der Belastung (hellgraue Boxplots) bei keiner, latenter sowie manifester respiratorischer Insuffizienz.

Außer bei Kalb 853 wiesen die Kälber mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz am Belastungsende einen $S_{\bar{v},O_2}$-Abfall auf, der sich bis zum Ende der Erholungsphase fortsetzte (Abb. 50). Bei den Kälbern mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz wurde ein statistisch signifikant niedrigerer $S_{\bar{v},O_2}$-Ruhewert als in der Referenzgruppe gemessen (Mann-Whitney-Test: P = 0,021).

4.6.4. Aktueller arterieller Sauerstoffhalbsättigungsdruck

Der aktuelle Sauerstoffhalbsättigungsdruck (**P_{50}**) im arteriellen Blut der Kälber der Statusgruppe **Ia** wies am Belastungsende einen statistisch signifikanten Anstieg (Wilcoxon-Test: P = 0,029) von einem Ruhewert von 3,82 ± 0,22 kPa auf 3,94 ± 0,18 kPa auf und zeigte nach einem stetigen Abfall 30 min nach Belastungsende wieder die Ausgangswerte.

Bei den Kälbern mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz wurde ein statistitisch signifikant niedriger P_{50}-Ruhewert als bei der Referenzgruppe ermittelt (Mann-Whitney-Test. P = 0,016; Abb. 51). Das Verhalten des P_{50}-Verlaufes war am Belastungsende und in der Erholungsphase innerhalb der beiden Statusgruppen nicht einheitlich.

Die Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz zeigten P_{50}-Ruhewerte innerhalb des unteren Referenzbereichs und unter Belastung wurde bei 9 der 12 Kälber ein Anstieg des P_{50} hervorgerufen (Abb. 51). Dieser Anstieg war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P = 0,034).

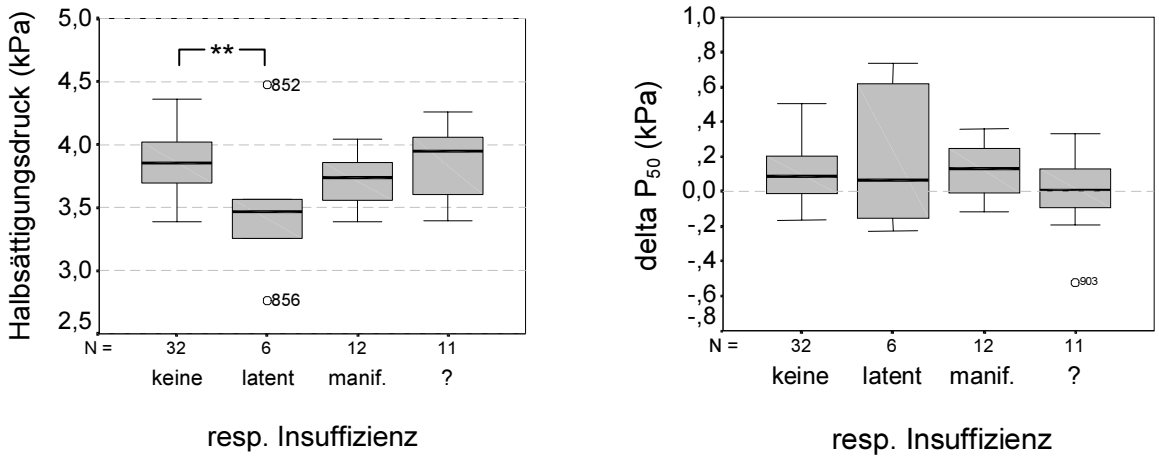

*Abb. 51: Aktueller Sauerstoffhalbsättigungsdruck (P_{50}) im arteriellen Blut in Ruhe (linke Grafik, **U-Test: P 0,016) und Differenz des aktuellen Sauerstoffhalbsättigungsdrucks zwischen Belastungsende und Ruhe (rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.*

4.6.5. Sauerstoffkapazität

Die arterielle Sauerstoffkapazität der Statusgruppe **Ia** betrug in Ruhe 11,74 ± 2,22 mmol/l. Bei den Kälbern mit latenter und mit fraglicher respiratorischer Insuffizienz entsprachen die Ruhewerte denen des Referenzbereichs und nur bei den Kälbern mit manifester respiratorischer Insuffizienz wurden mit 10,63 ± 1,65 mmol/l (nicht-signifikant) niedrigere Ruhewerte ermittelt. Bei allen durchgeführten Belastungstests traten nach der Laufbandarbeit keine signifikanten Veränderungen im Verlauf der arteriellen Sauerstoffkapazität auf.

4.6.6. Alveolo-arterielle Sauerstoffpartialdruckdifferenz

Die ergometrische Belastung der klinisch gesunden Kälber der Statusgruppe **Ia** rief bei 23 der 27 Belastungstests einen Abfall der alveolo-arteriellen Sauerstoffpartialdruckdifferenz (**AaD_{O_2}**) hervor (Abb. 52).

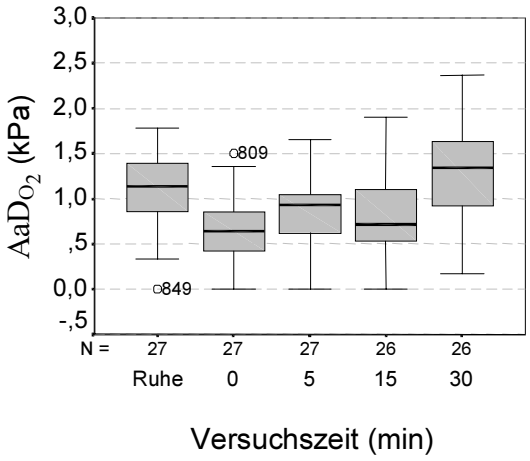

Abb. 52: Verläufe der alveolo-arteriellen Sauerstoffpartialdruckdifferenz vor und nach der motorischen Belastung bei allen Kälbern der Statusgruppe Ia. Der Abfall vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

Dieser Abfall von einem Ruhewert von 1,10 ± 0,41 kPa (Wertebereich: 0,0 – 1,78 kPa) um 0,47 ± 0,43 kPa am Belastungsende war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).
Bei den Kälbern mit klinischen Symptomen einer respiratorischen Erkrankung der Statusgruppe **Ib** trat dieser AaD_{O_2}-Abfall nur bei 4 von 7 Belastungstests auf (Abfall am Belastungsende um 0,31 ± 0,30 kPa), die Ruhewerte lagen aber innerhalb des Referenzbereichs (Abb. 53).

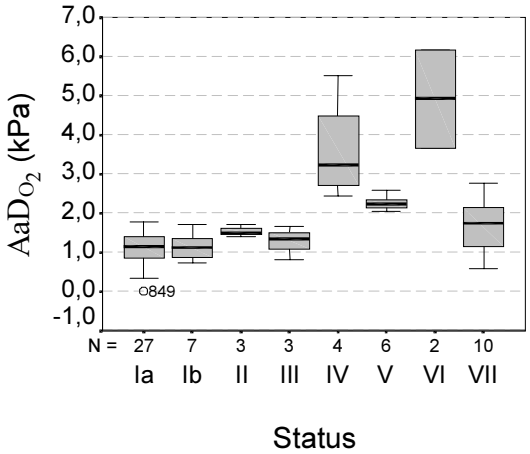

Abb. 53: Alveolo-arterielle Sauerstoff-partialdruckdifferenz in Ruhe bei den Kälbern der Statusgruppen I – VII. Die Werte der Statusgruppen IV – VI waren statistisch signifikant höher im Vergleich zur Statusgruppe Ia (U-Test: P < 0,001).

Bei den Kälbern mit Symptomen einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz lagen die AaD_{O_2}-Ruhewerte der Statusgruppe **II** mit 1,39 bis 1,70 kPa an der oberen Grenze des Referenzbereichs (Abb. 53) und 30 min nach Belastungsende trat ein AaD_{O_2}-Anstieg auf 2,34 ± 0,30 kPa auf (Abb. 54). Dagegen bewirkte die motorische Belastung der Kälber der Statusgruppe **III** direkt am Belastungsende einen Anstieg der AaD_{O_2} von 1,27 ± 0,43 kPa in Ruhe auf 2,76 ± 0,57 kPa (Abb. 54).

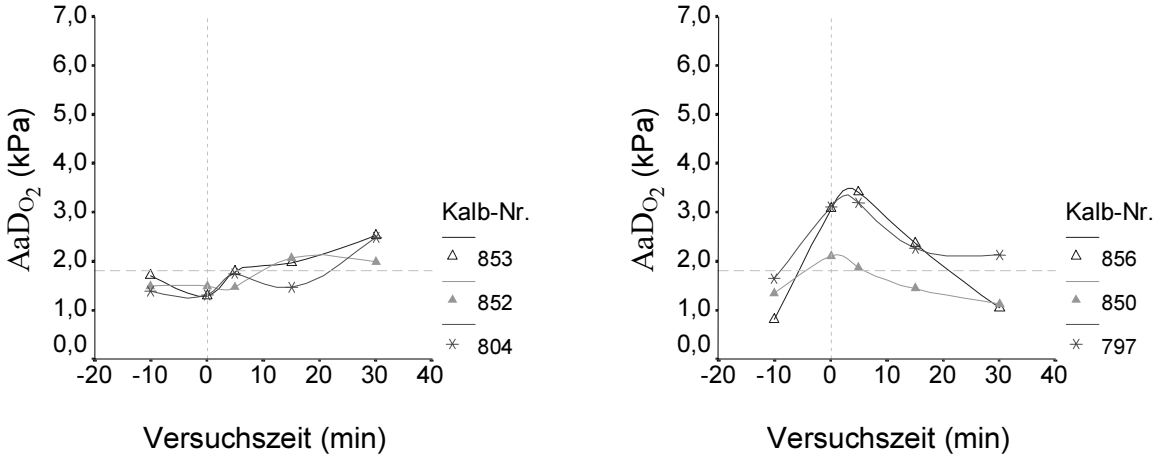

Abb. 54: Verläufe der Alveolo-arteriellen Sauerstoffpartialdruckdifferenz vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppen II (linke Grafik) und III (rechte Grafik).

Bei den Kälbern mit Syptomen einer **manifesten** respiratorischen Erkrankung (Status IV-VI) lagen die AaD_{O_2}-Ruhewerte mit 2,04 - 6,16 kPa (Abb. 53) signifikant höher als die des Referenzbereichs (Mann-Whitney-Test: $P < 0{,}001$). Bei den motorischen Belastungen der Statusgruppe **IV** zeigte sich – außer bei Kalb Nr. 902 - am Belastungsende ein deutlicher Abfall der AaD_{O_2} um 2,03 ± 0,48 kPa (Abb. 55) und auch noch 30 min nach Belastungsende wurden diese niedrigen AaD_{O_2}-Werte beibehalten. Ebenfalls ein AaD_{O_2}-Abfall am Belastungsende (um 0,88 ± 0,31 kPa) zeigte sich in der Statusgruppe **V**, aber hier wurden 30 min nach Belastungsende die Ruhewerte wieder eingenommen (Abb. 55).

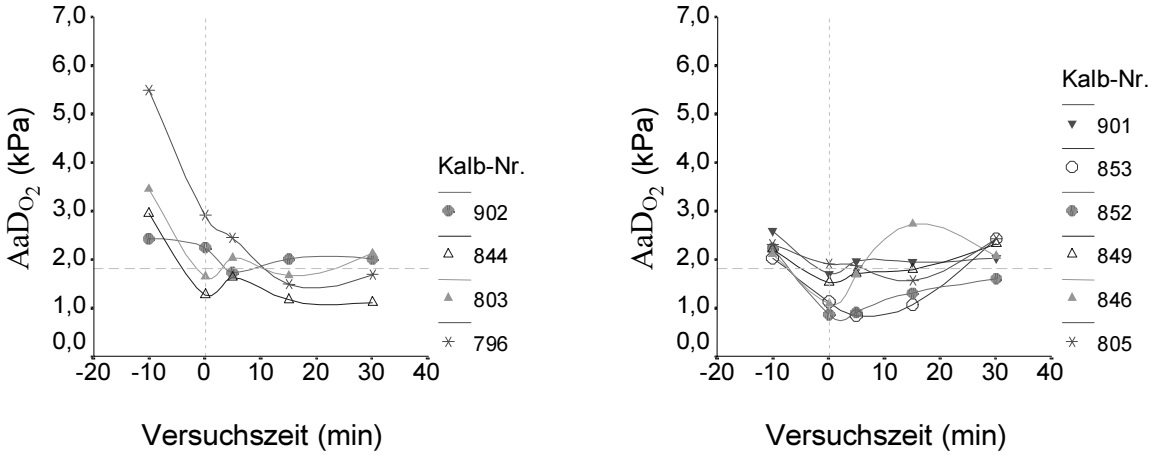

Abb. 55: Verläufe der alveolo-arteriellen Sauerstoffpartialdruckdifferenz vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppen IV (linke Grafik) und V (rechte Grafik).

Bei beiden Kälbern der Statusgruppe **IV** traten vor und nach der motorischen Belastung AaD_{O_2}-Werte größer 2,5 kPa auf (Abb. 56).

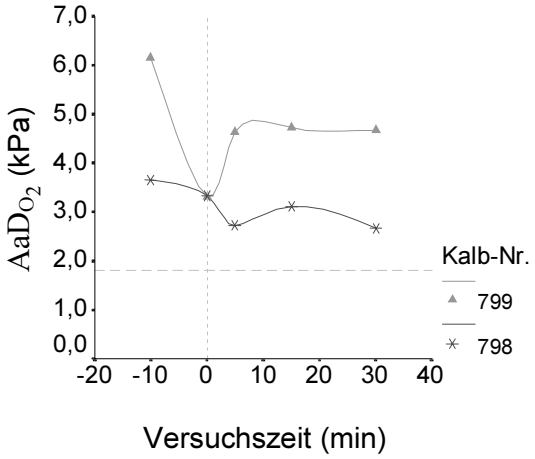

Abb. 56: Verläufe der alveolo-arteriellen Sauerstoffpartialdruckdifferenz vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppen VI.

Der AaD_{O_2}-Abfall am Belastungsende bei den 12 Kälbern mit Symptomen einer **manifesten** respiratorischen Erkrankung war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: $P = 0{,}002$).

4.6.7. Arterio - gemischt-venöse Sauerstoffdifferenz

Die arterio - gemischt-venöse Sauerstoffdifferenz (**$a\bar{v}D_{O_2}$**) der Kälber der Statusgruppe **Ia** betrug in Ruhe 1,98 ± 0,03 mmol/l und lag im Bereich von 1,38 bis 2,69 mmol/l (außer Kalb Nr.903). Am Belastungsende und auch in der Erholungsphase traten bei den jeweiligen Belastungstests nur geringgradige und keine einheitlichen Veränderung der $a\bar{v}D_{O_2}$ auf (Abb. 57). Ein deutlich erhöhtes Niveau innerhalb der Statusgruppe Ia zeigte nur der Verlauf des Belastungstests von Kalb Nr. 903 mit der Belastungsstufe A.

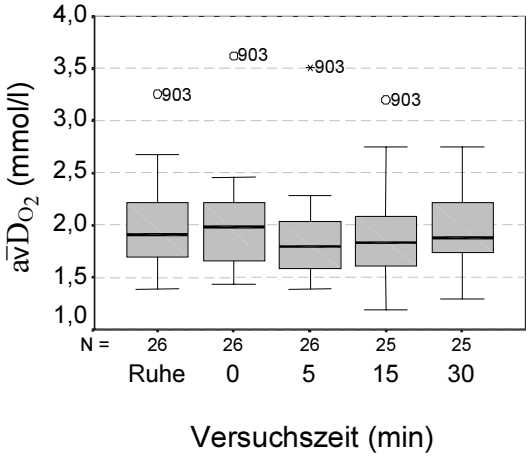

Abb. 57: Verläufe der arterio – gemischt-venösen Sauerstoffdifferenz vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern des Status Ia (n. s.).

Bei den Kälbern mit Symptomen einer **latenten** bzw. **manifesten** respiratorischen Insuffizienz lagen die $a\bar{v}D_{O_2}$-Ruhewerte innerhalb des Referenzbereichs (Abb. 58). Auch hier zeigten sich nach der motorischen Belastung innerhalb der einzelnen Statusgruppen keine einheitlichen Veränderungen im $a\bar{v}D_{O_2}$-Verlauf.

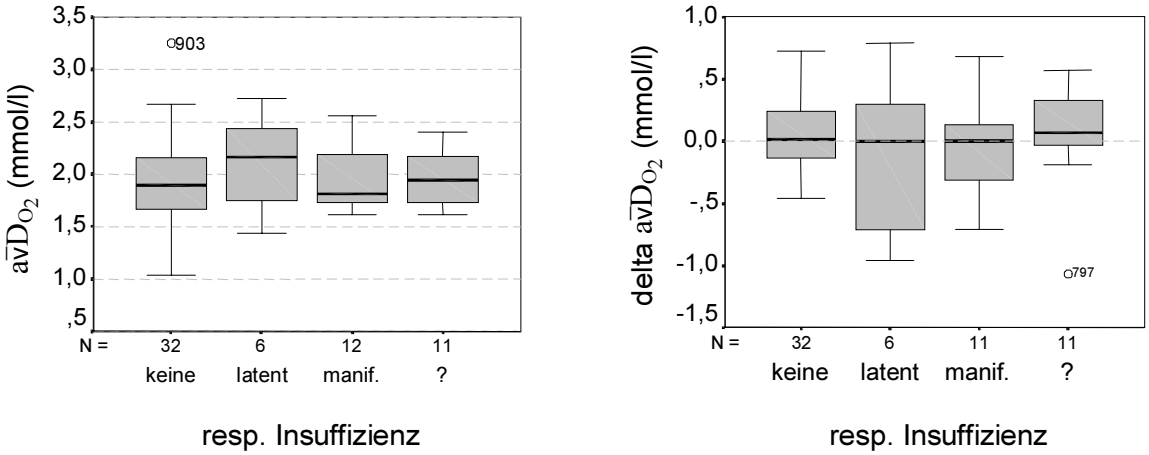

Abb. 58: Arterio – gemischt-venöse Sauerstoffdifferenz in Ruhe (linke Grafik, n. s.) und Differenz der arterio – gemischt-venösen Sauerstoffdifferenz zwischen Belastungsende und Ruhe (rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

4.6.8. Shunt

Für die Kälber der Statusgruppe **Ia** wurde am Belastungsende ein statistisch signifikanter Abfall des Shunts von 4,28 ± 1,39 % (0,75 - 6,35 %) in Ruhe auf 2,98 ± 1,60 % ermittelt (Wilcoxon-Test: P < 0,001). Nur bei 3 der 27 Belastungstest wurde am Belastungsende ein Anstieg registriert. Nach 5 min Erholung wurden die individuellen Ruhewerte wieder erreicht und 30 min nach Belastungsende lagen die mittleren Shunt-Werte mit 5,23 ± 1,74 % (nicht-signifikant) höher als die Ausgangswerte (Abb. 59).

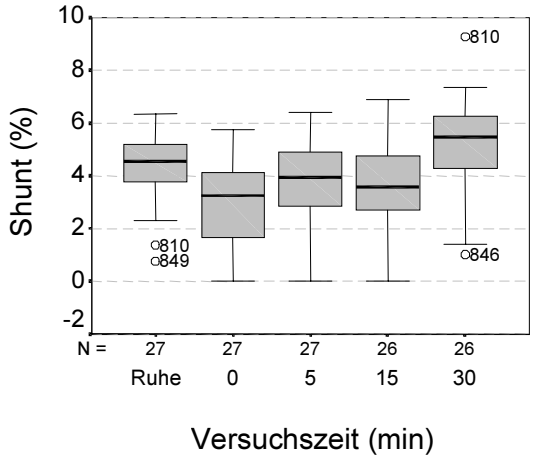

Abb. 59: Verläufe des Shunts vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppe Ia. Der Abfall vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

Während bei den Kälbern mit Symptomen einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz die Shunt-Ruhewerte mit 5,33 ± 1,52 % innerhalb des Referenzbereichs lagen, wurden bei den Kälbern mit Symptomen einer **manifesten** respiratorischen Insuffizienz signifikant höhere Ruhewerte ermittelt (Abb. 60; Mann-Whitney-Test: P < 0,001).

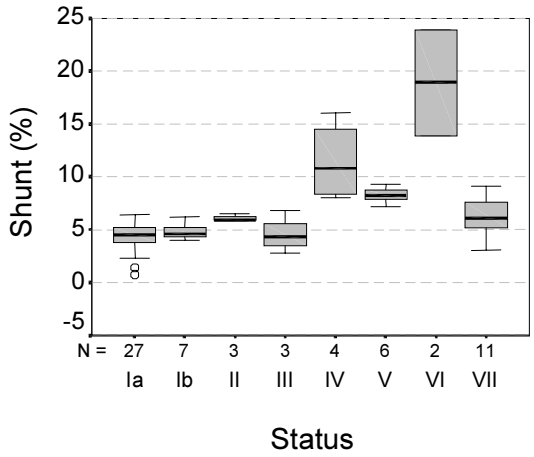

Abb. 60: Shunt in Ruhe bei den Kälbern der Statusgruppen I bis VII. Die Werte der Statusgruppen IV – VI (Kälber mit Symptomen einer manifesten respiratorischen Insuffizienz) waren statistisch signifikant höher im Vergleich zur Statusgruppe Ia (U-Test: P < 0,001).

Bei den Belastungstests der Statusgruppe **II** wurde am Belastungsende nur bei 2 der 3 Probanden ein geringgradiger Abfall des Shunts registriert, 30 min nach Belastungsende wurde jedoch ein Anstieg um 2,31 ± 1,01 kPa ermittelt (Abb. 61). Die Kälber der Statusgruppe **III** zeigten am Belastungsende einen starken Anstieg des Shunts um 5,5 ± 0,95 %.

Bei 2 der 3 Probanden setzte sich dieser Anstieg bis 5 min nach Belastungsende fort; 30 min nach Belastungsende wurden die Ausgangswerte wieder erreicht (Abb. 61).

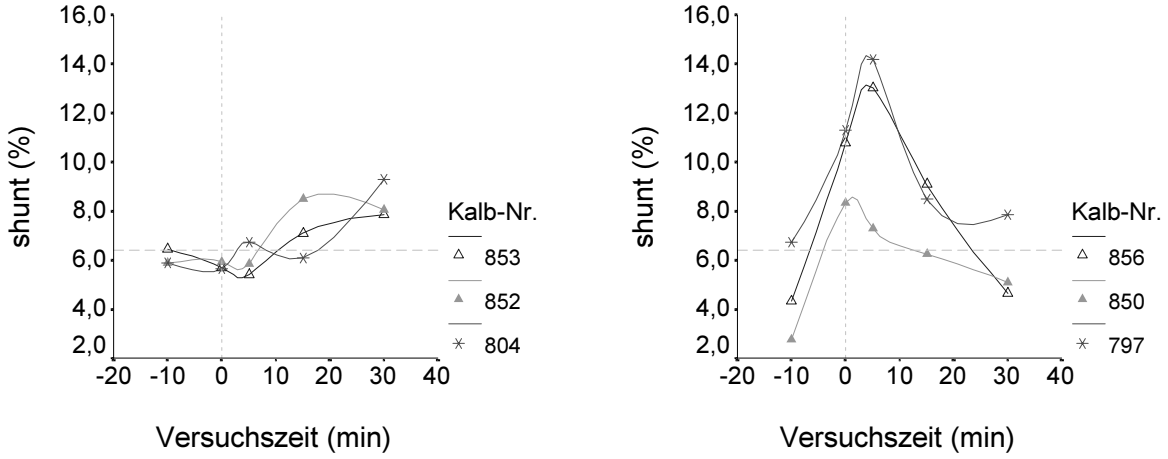

Abb. 61: Verläufe des Shunts vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppen II (linke Grafik) und III (rechte Grafik).

Bei den Kälbern mit Symptomen einer **manifesten** respiratorischen Insuffizienz trat am Belastungsende ein statistisch signifikanter Abfall des Shunts um 3,68 ± 2,83 % auf (Wilcoxon-Test: P = 0,003). Während bei den motorischen Belastungen der Statusgruppe **IV** dieses erniedrigte Niveau auch 30 min nach Belastungende beibehalten wurde, erlangten die Probanden der Statusgruppe **V** ihre Ausgangswerte wieder (Abb. 62).

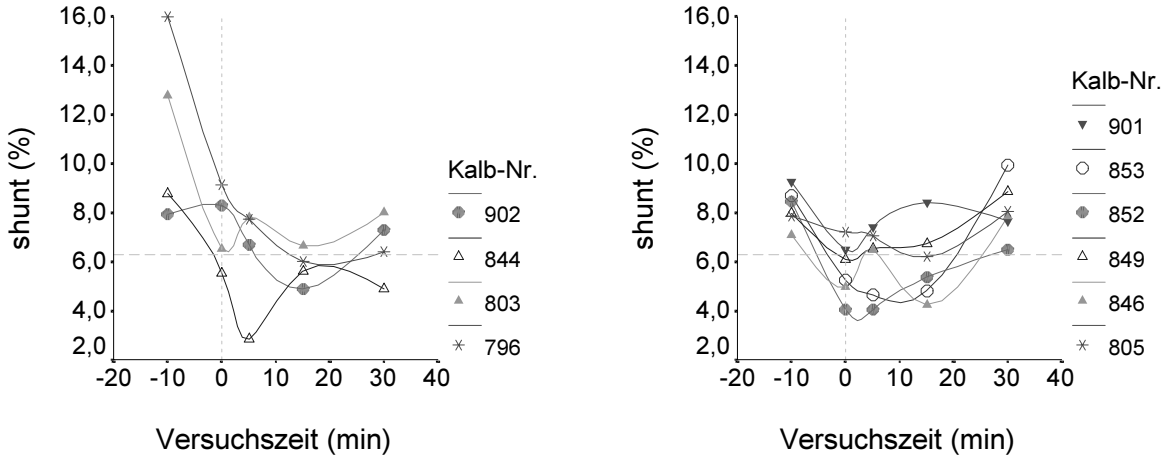

Abb. 62: Verläufe des Shunts vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppen IV (linke Grafik) und V (rechte Grafik).

Die Shunt-Werte der beiden Kälber der Statusgruppe **VI** lagen vor und nach der motorischen Belastung im Bereich von 9,25 bis 23,93 %. Am Belastungsende trat ein Abfall von 2,10 % (Kalb-Nr. 798) bzw. 9,58 % (Kalb Nr. 799) auf und auch 30 min nach Belastungsende waren die Werte im Vergleich zu den Ausgangswerten noch erniedrigt.

Bei den Kälbern mit **fraglicher** respiratorischer Insuffizienz wurden mit 6.31 ± 1,83 % statistisch signifikant höhere Ruhewerte als bei der Referenzgruppe ermittelt (Abb. 60; Mann-Whitney-Test: P = 0,003). Das Verhalten des Shunt-Verlaufes nach der motorischen Belastung war nicht einheitlich: So trat am Belastungsende bei 6 Tests ein geringgradiger Abfall und bei 5 Tests ein Anstieg des Shunts auf, wobei nur Kalb Nr. 844 der Untergruppe b einen hochgradigen Anstieg um 7,6 % zeigte.

4.7. Säuren-Basen-Haushalt

4.7.1. pH-Wert

- arteriell

Der arterielle pH-Wert (**pH_a**) lag bei den Kälbern der Statusgruppe **Ia** in Ruhe im Bereich von 7,40 - 7,46 mit einem Mittelwert von 7,42 ± 0,02. Am Belastungsende sowie in der Erholungsphase traten nur geringgradige und keine einheitlichen Veränderungen des pH_a auf (Abb. 63). Nur Kalb 903 (Belastung A; mit gemischt-venöser Hypoxämie und Hyperkapnie) zeigte einen Abfall des pH_a von 7,41 in Ruhe auf 7,35 fünf Minuten nach Belastungsende, erreichte aber 30 min nach der Belastung wieder die Ruhewerte.

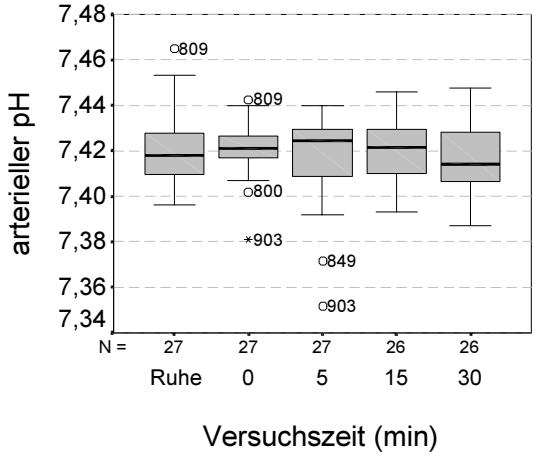

Abb. 63: Verläufe des arteriellen pH-Wertes vor und nach der motorischen Belastung bei allen Kälbern der Statusgruppe Ia (n. s.).

Die Kälber mit **latenter** repiratorischer Insuffizienz zeigten weder in Ruhe noch nach der Belastung Abweichungen vom Verlauf der Referenzgruppe (Abb. 64). Bei den motorischen Belastungen der Statusgruppe **II** mit einem P_{a,CO_2}-Anstieg (Abb. 44) trat ein tendenzieller, stetiger Abfall des pH_a um 0,02 bis 30 min nach Belastungsende auf. Die Verläufe des pH_a der Statusgruppe **III** zeigen ein einheitliches Bild: Anstieg um 0,02 direkt am Belastungsende und Abfall auf Ruhewerte 15 min nach der Belastung.

Bei den Kälbern der Statusgruppen **Ib** bzw. **III** mit normoxämischem Ruhewert und arterieller Hyperkapnie (Abb. 43) lagen die pH_a-Verläufe mit Werten von 7,39 – 7,44 innerhalb des Referenzbereichs.

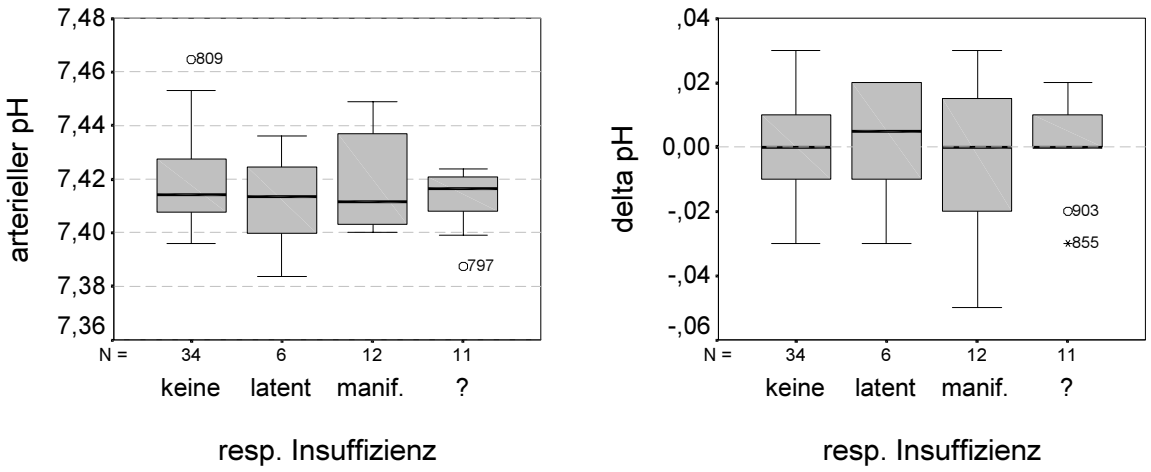

Abb. 64: Arterieller pH-Wert in Ruhe (linke Grafik, n. s.) und Differenz des arteriellen pH-Wertes zwischen Belastungsende und Ruhe (rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

Auch die pH_a -Verläufe der Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz wiesen weder in Ruhe noch nach der Belastung Abweichungen von der Referenzgruppe auf (Abb. 64). Somit lagen auch die pH_a-Verläufe bei den Kälbern mit manifester Globalinsuffizienz (Abb. 45) mit pH_a -Werten von 7,39 bis 7,44 innerhalb des Referenzbereichs.

- gemischt-venös

Der gemischt-venöse pH-Wert (**$pH_{\bar{v}}$**) der Statusgruppe **Ia** betrug in Ruhe 7,37 ± 0,01 und lag im Bereich von 7,35 bis 7,39. Nach der Belastung traten keine Veränderungen des $pH_{\bar{v}}$ auf; die maximale Abweichung vom Ruhewert betrug –0,02 zum Zeitpunkt 30 min nach Belastungsende. Eine abweichende Verlaufsform innerhalb der Statusgruppe Ia zeigte Kalb Nr. **903** mit der Belastungsstufe A (erniedrigter Ruhe-$pH_{\bar{v}}$ von 7,32; Abfall auf 7,26 am Belastungsende und Rückkehr zu den Ruhewerten 30 min nach der Belastung) und Kalb Nr. **809** mit der Belastungsstufe B (erhöhter Ruhe-$pH_{\bar{v}}$ von 7,42; Abfall auf 7,40 fünf Minuten nach Belastungsende und Rückkehr zu den Ruhewerten 30 min nach der Belastung).

Bei der Mehrzahl (83 %) der Kälber mit Symptomen einer latenten, manifesten oder fraglichen respiratorischen Insuffizienz lag der $pH_{\bar{v}}$-Verlauf innerhalb des Referenzbereichs.

Bei den Kälbern mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz zeigten Kalb Nr. **852** (Status **II**) und Kalb Nr. **797** (Status **III**) einen erniedrigten $pH_{\bar{v}}$-Verlauf: Ruhe- $pH_{\bar{v}}$ von 7,35; Abfall auf 7,30 fünf Minuten nach der Belastung und bei Kalb Nr. 797 Rückkehr zu den Ruhewerten 30 min nach der Belastung.

Ebenfalls ein V-förmigen $pH_{\bar{v}}$-Verlauf wurde bei den Kälbern der Statusgruppe **IV** registriert, wobei Kalb Nr. **796** und Kalb Nr. **902** einen Abfall auf 7,30 bzw.7,28 am Belastungsende zeigten. Den maximalen $pH_{\bar{v}}$-Abfall von 0,8 zeigte Kalb **799** der Statusgruppe **VI** (Ruhe-$pH_{\bar{v}}$ von 7,42; Abfall auf 7,34 am Belastungsende, 30 min nach Belastungsende 7,38).

4.7.2. Aktuelles und Standardisiertes Bikarbonat im arteriellen Blut

Das Aktuelle Bikarbonat im arteriellen Blut (**ABC_a**) der Statusgruppe **Ia** betrug in Ruhe 31,0 ± 1,1 mmol/l und lag im Bereich von 29,5 – 33,8 mmol/l. Weder am Belastungsende noch in der Erholungsphase traten signifikante Abweichungen vom Ruhewert auf. Ein erniedrigtes Niveau innerhalb der Statusgruppe Ia zeigte nur Kalb Nr. **903** (Belastung A) mit Werten zwischen 26,0 und 28,1 mmol/l.

Bei den Kälbern mit manifester Globalinsuffizienz (Abb. 45) traten mit ABC_a-Werten von 33,1 - 37,2 mmol/l (35,0 ± 1,2 mmol/l) vor und nach der Belastung gegenüber dem Referenzbereich statistisch signifikant höhere Werte auf (Mann-Whitney-Test: P = 0,002). An der oberen Grenze des Referenzbereichs lagen die ABC_a -Verläufe bei den motorischen Belastungen mit arterieller Normoxämie und Hyperkapnie (Abb. 43) mit ABC_a-Werten von 32,6 – 34,7 mmol/l (33,5 ± 0,6 mmol/l) vor und nach der Belastung.

Auch das Standardisierte Bikarbonat veränderte sich unter Belastung nicht und lag bei der Statusgruppe Ia vor und nach der Belastung im Bereich von 28,8 - 33,2 mmol/l (30,7 ± 1,0 mmol/l). Die Abweichungen vom Referenzbereich betrafen dieselben Gruppen wie beim ABC_a.

4.7.3. Aktueller und Standardisierter Basenüberschuss im arteriellen Blut

Der aktuelle Basenüberschuss im arteriellen Blut (**ABE_a**) der Statusgruppe **Ia** betrug in Ruhe 6,8 ± 1,1 mmol/l (5,1 - 9,4 mmol/l). Auch hier traten nach der motorischen Belastung keine statistisch gesicherten Veränderungen der Werte auf. Innerhalb der Statusgruupe Ia zeigte wieder der ABE_a-Verlauf von Kalb Nr. **903** (Belastung A) ein erniedrigtes Niveau, welches im Bereich von 2,1 bis 4,0 mmol/l lag.

Abweichungen vom Referenzbereich mit einem signifikant höheren ABE_a-Niveau wiesen wieder die Kälber mit Symptomen einer manifesten Globalinsuffizienz (Abb. 45; P < 0,001) mit ABE_a-Werten von 8,5 - 12,2 mmol/l (10,3 ± 1,1 mmol/l) sowie die Kälber mit arterieller Normoxämie und Hyperkapnie (Abb. 43) mit ABE_a-Werten von 8,0 - 10,2 mmol/l (8,9 ± 0,6 mmol/l) auf.

Der Standardisierte Basenüberschuss lag bei der Statusgruppe Ia vor und nach der Belastung im Bereich von 5,1 bis 9,9 mmol/l (7,1 ± 1,0 mmol/l). Die Abweichungen vom Referenzbereich betrafen die selben Gruppen wie beim ABE_a.

4.8. Hämatokrit und Hämoglobinspektrum

4.8.1. Hämatokrit

Die ergometrische Belastung der Kälber des Status **Ia** führte zu einem stetigen, äußerst geringgradigen Abfall des Hämatokrit (**Hct**) in Ruhe von 0,27 ± 0,05 l/l um 0,01 ± 0,00 l/l bis

15 min nach Belastungsende, der auch 30 min nach Belastungsende noch registriert werden konnte.

Nur der Ruhe-Hct der Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz lag mit 0,24 ± 0,04 l/l tendenziell niedriger als der des Referenzbereichs. Unter bzw. nach der Laufbandarbeit traten innerhalb der Statusgruppen **Ib - VII** nur geringgradige und keine einheitlichen Abweichungen vom Ruhewert auf.

4.8.2. Gesamthämoglobin

Der Gesamthämoglobingehalt des Blutes (**tHb**) der Kälber des Status **Ia** betrug in Ruhe 5,42 ± 1,04 mmol/l. Die Laufbandarbeit führte zu einem äußerst geringgradigem Abfall auf 5,25 ± 1,09 mmol/l bis 15 min nach Belastungsende.

Der Ruhe-tHb der respiratorisch erkrankten Kälber lag innerhalb des Referenzbereichs, bei den **manifest** erkrankten Kälbern mit 4,75 ± 0,72 mmol/l an der unteren Grenze des Referenzbereichs. Innerhalb der Statusgruppen **Ib – VII** traten unter motorischer Belastung und in der Erholungsphase keine signifikanten Veränderungen des tHb auf.

4.8.3. Oxygeniertes Hämoglobin

Ergometrische Belastung der Kälber des Status **Ia** führte zu einem Anstieg des oxygenierten Hämoglobins (**O_2Hb**) im arteriellen Blut von einem Ruhewert von 95,13 ± 0,63 % um 0,23 ± 0,69 % am Belastungsende. Dieser Anstieg war im Gruppenmittel statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P = 0,046), obwohl bei 8 der 27 Belastungstests ein O_2Hb-Abfall registriert wurde. In der Erholungsphase trat ein stetiger O_2Hb-Abfall auf, sodass 30 min nach Belastungsende um 0,5 ± 0,81 % niedrigere O_2Hb-Werte als in Ruhe gemessen wurden.

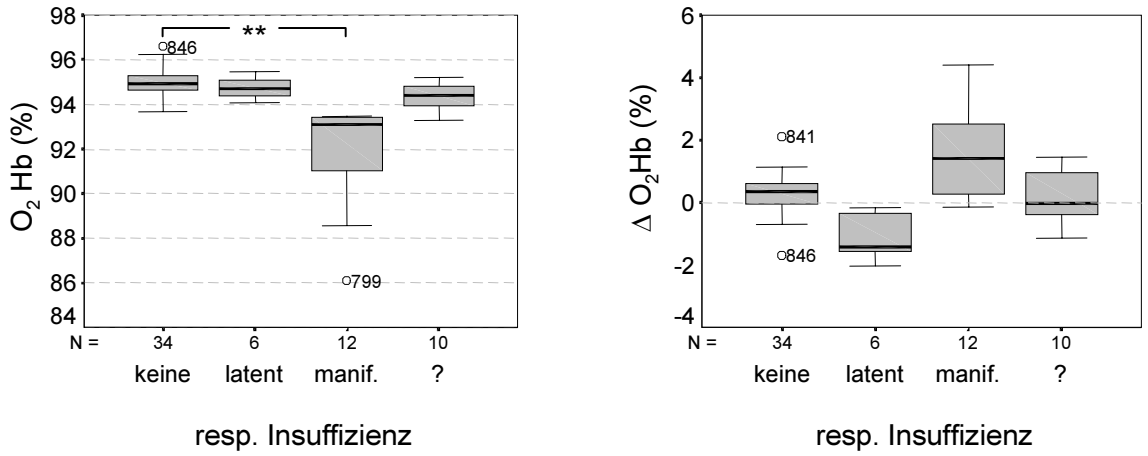

*Abb. 65: Oxygeniertes Hämoglobin in Ruhe (linke Grafik, **U-Test: P < 0,001) und Änderung des oxygenierten Hämoglobins am Belastungsende (d. h. Differnz zwischen Belastungsende und Ruhe, rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.*

Bei den Kälbern mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz wurde am Ende der Laufbandarbeit ein statistisch signifikanter Abfall des O_2Hb (Wilcoxon-Test: P = 0,028) beobachtet (Abb. 65). Während sich bei den Kälbern der Statusgruppe **II** dieser O_2Hb-Abfall bis 30 min nach Belastungsende fortsetzte, erlangten die Kälber der Statusgruppe **III** zu diesem Zeitpunkt ihre Ausgangswerte wieder.
Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz zeigten signifikant niedrigere O_2Hb-Ruhewerte als die Referenzgruppe Ia (Mann-Whitney-Test: P < 0,001; Abb. 65). Unter körperlicher Arbeit stiegen die O_2Hb-Werte statistisch signifikant an (Wilcoxon-Test: P = 0,008), blieben aber unter den Ruhewerten der Statusgruppe Ia. Dieser Anstieg setzte sich sowohl bei den Kälbern der Statusgruppe **IV** als auch **VI** bis zum Ende der Aufzeichnungen weiter fort. Bei den Kälbern der Statusgruppe **V** dagegen zeigten sich zu diesem Zeitpunkt wieder die Ausgangswerte.

4.8.4. Desoxygeniertes Hämoglobin

Das desoxygenierte Hämoglobin (**rHb**) des arteriellen Blutes der Kälber des Status **Ia** betrug in Ruhe 3,26 ± 0,56 % und zeigte einen spiegelbildlichen Verlauf zu dem des O_2Hb. Somit wurde am Belastungsende ein statistisch signifikanter Abfall des rHb auf 3,03 ± 0,62 % beobachtet (Wilcoxon-Test: P = 0,022).
Bei den respiratorisch erkrankten Kälbern zeigten die Abweichungen des Ruhewertes von dem Ruhewert der Referenzgruppe umgekehrte Proportionalität im Vergleich zum O_2Hb und auch der Verlauf war spiegelbildlich. Somit wiesen nur die Kälber mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz mit 6,54 ± 2,25 % einen statistisch signifikant höheren rHb-Ruhewert als die Referenzgruppe auf (Mann-Whitney-Test: P < 0,001). Am Belastungsende wurde bei den Kälbern mit **latenter** respiratorischer Insuffizienz ein statistisch signifikanter rHb-Anstieg (Wilcoxon-Test: P = 0,028), bei den Kälbern mit **manifester** respiratorischer Insuffizienz ein statistisch signifikanter rHb-Abfall (P = 0,005) beobachtet.

4.9. Atemgase

4.9.1. Sauerstoffaufnahme

Die Kälber des Status **Ia** steigerten unter Laufbandbelastung ihre Sauerstoffaufnahme ($\mathbf{V_{O_2}}$) von 38,78 ± 10,10 ml/min/kg^{0,75} (in Ruhe) auf 62,77 ± 19,56 ml/min/kg^{0,75} (am Belastungsende). Dieser Anstieg um 50,7 % (41,8 % – 71,6 %) bzw. auf das 1,5fache (1,4 – 1,7) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001). Schon 1 min nach Belastungsende wurden die Ruhewerte wieder eingenommen (Abb. 66).

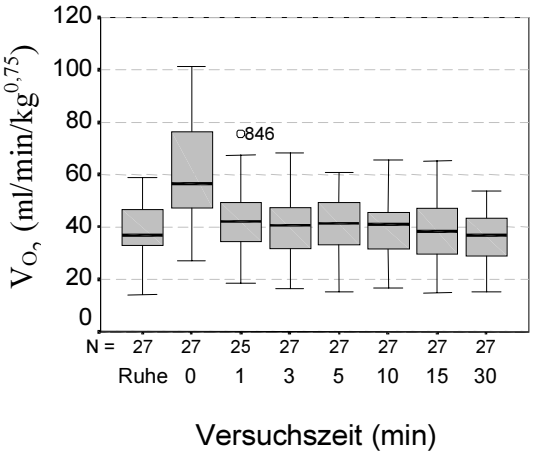

Abb. 66: Sauerstoffaufnahme in Bezug zur metabolischen Körpermasse vor und nach der motorischen Belastung bei den Belastungstests der Statusgruppe Ia. Der Anstieg vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

Respiratorisch erkrankte Kälber zeigten weder in Ruhe noch am Belastungsende und in der Erholungsphase Abweichungen vom V_{O_2}-Verlauf der Referenzgruppe Ia (Abb. 67).

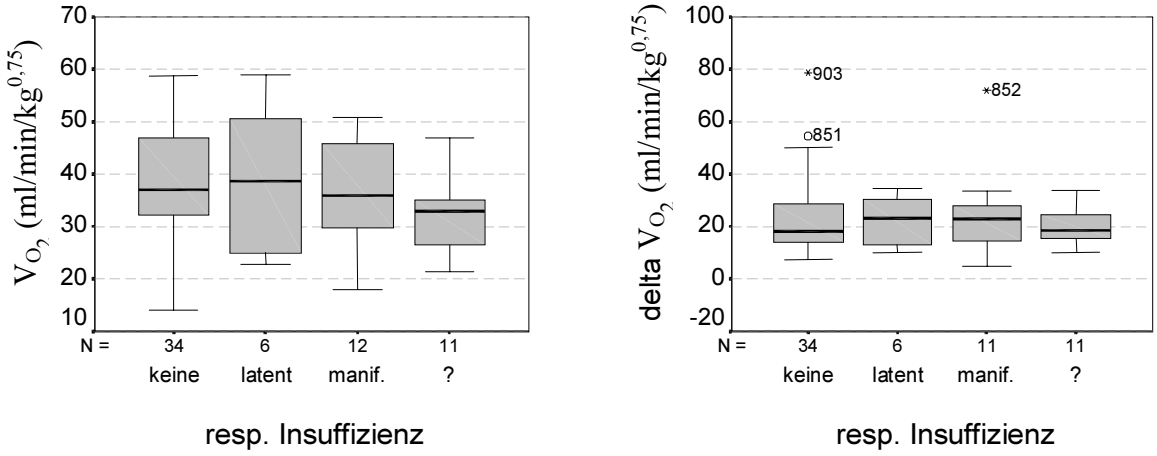

Abb. 67: Sauerstoffaufnahme in Bezug zur metabolischen Körpermasse in Ruhe (linke Grafik, n. s.) und Änderung der Sauerstoffaufnahme zum Belastungsende (d. h. Differenz zwischen V_{O_2}-Wert am Belastungsende und Ruhewert, rechte Grafik) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

4.9.2. Kohlendioxidabgabe

Unter Belastung stieg auch die Kohlendioxidabgabe (**V_{CO_2}**) der Kälber des Status Ia um das 1,5fache (Minimum - Maximum = 1,3 - 1,8) an (Abb. 68). Dieser Anstieg war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001). Bei den Belastungstests der Statusgruppen **Ib – VII** wurden weder in Ruhe noch am Belastungsende bzw. in der Erholungsphase Abweichungen vom V_{CO_2}–Verlauf der Referenzgruppe beobachtet.

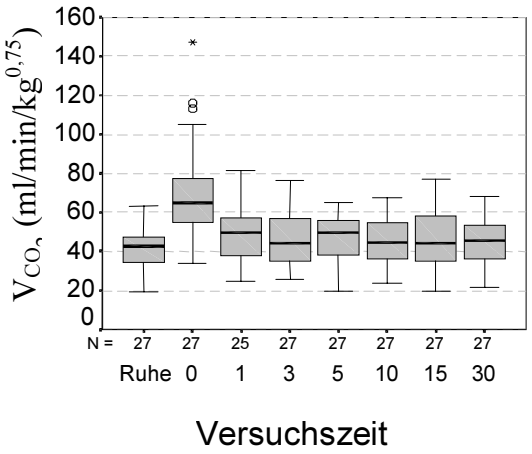

Abb. 68: Kohlendioxidabgabe vor und nach der motorischen Belastung bei den Kälbern der Statusgruppe Ia. Der Anstieg vom Ruhewert zum Belastungsende (Zeitpunkt 0) war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

4.9.3. Respiratorischer Quotient

Der respiratorische Quotient (**RQ**) der Kälber des Status **Ia** betrug in Ruhe 1,13 ± 0,18 und zeigte weder am Belastungsende noch in der Erholungsphase eine Veränderung. Der Verlauf des RQ der Statusgruppen **Ib bis VII** verhielt sich wie der der Referenzgruppe.

4.10. Körper- und Lungenkreislauf

4.10.1. Kardiale Parameter

Die ergometrische Belastung führte bei den Kälbern des Status **Ia** am Belastungsende zu einem statistisch signifikanten Anstieg der Herzfrequenz $\mathbf{f_C}$ (Ausnahme Kalb Nr. 810 in der Belastungsstufe C), des Schlagvolumens **SV** und des Herz-Zeit-Volumens **Q** (Tab. 20; Abb. 69).

Tab. 20: Herzfrequenz (f_C), Schlagvolumen (SV) und Herzzeitvolumen (Q) (Mittelwert ± Standardabweichung) in Ruhe und am Belastungsende sowie Signifikanz (P) des Anstiegs (Wilcoxon-Test) bei den Kälbern des Status Ia.

Parameter	Ruhe	Belastungsende	P
f_C (min^{-1})	123 ± 18	142 ± 23	< 0,005
SV (ml/kg)	1,84 ± 0,64	2,41 ± 0,70	< 0,001
Q (l/min/kg)	0,22 ± 0,07	0,34 ± 0,10	< 0,001

Die Ruhe-Ausgangswerte von f_C wurden nach ein bis drei Minuten, von SV und Q dagegen erst nach einer Erholung von 15 min wieder erreicht.

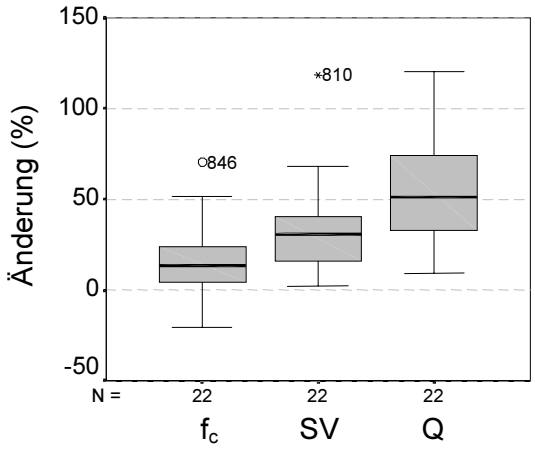

Abb. 69: Prozentuale Änderung von Herzfrequenz (f_C), Schlagvolumen (SV) und Herzzeitvolumen (Q) am Belastungsende bei den Kälbern des Status Ia (Kalb Nr. 903 in Belastungsstufe A mit ΔSV = 217 % und ΔQ = 318 % wurde nicht mit dargestellt).

Kälber mit Symptomen einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz wiesen $\mathbf{f_C}$-, **SV**- und **Q**-Ruhewerte innerhalb des Referenzbereichs auf. Am Belastungsende zeigten sie einen - dem Referenzbereich entsprechenden - Anstieg von **SV** und **Q**. Der Verlauf von $\mathbf{f_C}$ war jedoch am Belastungsende und in der Erholungsphase nicht einheitlich: so reagierten die Kälber 850 und 797 am Belastungsende mit einem $\mathbf{f_C}$-Abfall, die anderen 4 Kälber mit einem Anstieg.

Bei den Kälbern mit Symptomen einer **manifesten** respiratorischen Insuffizienz lagen die Ruhewerte von **SV** und **Q** ebenfalls innerhalb des Referenzbereichs, die $\mathbf{f_C}$-Ruhewerte von 135 ± 23/min waren jedoch tendenziell höher als die der Referenzgruppe Ia. Für die Statusgruppen **IV** und **V** entsprachen die Reaktionen von **SV** und **Q** auf die motorische Belastung denen der Referenzgruppe, wenn auch der Anstieg von **SV** um 1,3 ± 1,0 ml/kg tendenziell höher war (Referenzgruppe ΔSV = 0.6 ± 0,4 ml/kg). Die Reaktion von $\mathbf{f_C}$ war am Belastungsende nicht einheitlich (5 ansteigende Verläufe, 4 abfallende), das Ruhe-Niveau wurde nach 3 min Erholung wieder eingenommen. Bei den beiden Kälbern des Status **VI** wurden die Ruhewerte auch nach 30 min Erholung nicht erreicht: f_C-Anstieg um ca. 20/min, SV-Abfall um ca. 1,1 ml/kg, Q-Abfall um ca. 1,7 l/min/kg zum Zeitpunkt 30 min nach Belastungsende.

Bei den 11 Kälbern, bei denen anhand des $P_{a,\,O2}$-Verlaufs eine Zuordnung zu den Gruppen der respiratorischen Insuffizienz **fraglich** erschien, entsprachen sowohl die Ruhewerte von $\mathbf{f_C}$, **SV** und **Q** als auch die Verläufe von **SV** und **Q** nach der Belastung denen der Referenzgruppe. Nur der Anstieg von $\mathbf{f_C}$ am Belastungsende um 40 ± 25/min war tendenziell stärker als der der Referenzgruppe um 19 ± 22/min.

4.10.2. Blutdruck in der *Aorta abdominalis*

Bei den Kälbern des Status **Ia** wurde unmittelbar am Belastungsende ein statistisch signifikanter Abfall des diastolischen Blutdruckes $\mathbf{P_a}$, und ein signifikanter Anstieg des systolischen Blutdruckes $\mathbf{P_{a,sys}}$ in der *Aorta abdominalis* beobachtet. Somit führte die motorische Belastung zu einem signifikanten Anstieg der Blutdruckamplitude $\mathbf{\Delta P_a}$, wogegen

der mittlere Blutdruck in der *Aorta abdominalis* $\overline{P}_a$ am Belastungsende keine einheitlichen Verlaufsformen zeigte (Tab. 21).
Schon eine Minute nach Belastungsende wurde für alle oben genannten veränderten Parameter das Ruhe-Niveau wieder eingenommen und im anschließenden 30-minütigen Messzeitraum wurden keine Abweichungen mehr festgestellt.

Tab. 21: Diastolischer ($P_{a,dia}$), systolischer ($P_{a,sys}$) und mittlerer ($\overline{P}_a$) Blutdruck sowie Blutdruckamplitude (ΔP_a) in der Aorta abdominalis (Mittelwert ± Standardabweichung) in Ruhe und am Belastungsende bei den Kälbern des Status Ia und Signifikanz (P) der Veränderungen (Wilcoxon-Test).

Parameter	Ruhe	Belastungsende	P
$P_{a,dia}$ (kPa)	11,5 ± 2,0	10,5 ± 1,5	< 0,001
$P_{a,sys}$ (kPa)	17,7 ± 2,3	18,8 ± 2,6	< 0,005
$\overline{P}_a$ (kPa)	13,7 ± 1,9	13,5 ± 2,4	> 0,5
ΔP_a (kPa)	6,2 ± 1,2	8,3 ± 1,7	< 0,001

Die Kälber mit Symptomen einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz wiesen für alle oben genannten Parameter Ruhewerte innerhalb des Referenzbereichs auf, zeigten aber am Belastungsende innerhalb der jeweiligen Statusgruppen keine einheitlichen Veränderungen der einzelnen Parameter.
Auch bei den Kälbern mit Symptomen einer **manifesten** respiratorischen Erkrankung lagen die Ruhewerte aller oben genannten Parameter innerhalb des Referenzbereichs, jedoch wurde nur ein tendenzieller Abfall von $\mathbf{P_{a,dia}}$ (7 von 10 Belastungstests) und ein tendenzieller Anstieg von $\mathbf{P_{a,sys}}$ (8 von 10 Belastungstests) am Belastungsende registriert.

4.10.3. Blutdruck in der *Arteria pulmonalis*

Die Kälber des Status **Ia** reagierten auf die motorische Belastung am Belastungsende mit einem statistisch signifikanten Anstieg des systolischen Blutdrucks in der *A. pulmonalis* $\mathbf{P_{pulm,sys}}$ (Wilcoxon-Test: P < 0,001; Abb.) und einem signifikanten Abfall des diastolischen Blutdrucks $\mathbf{P_{pulm,dia}}$ (Wilcoxon-Test: P < 0,001; Abb.). Der mittlere Blutdruck in der *A. pulmonalis* $\overline{P}_{pulm}$ wies am Belastungsende keine einheitlichen Verläufe auf (9 abfallende und 17 ansteigende $\overline{P}_{pulm}$-Verläufe; Änderung am Belastungsende: delta $\overline{P}_{pulm}$ = 0,06 ± 0,68 kPa); die Veränderungen waren jedoch nur geringgradig. Die Blutdruckamplitude $\mathbf{\Delta P_{pulm}}$ zeigte einen statistisch signifikanten Anstieg (Wilcoxon-Test: P < 0,001) von 4,42 ± 1,25 kPa in Ruhe auf 9,07 ± 2,78 kPa am Belastungsende. Schon eine Minute nach Belastungsende wurde für alle oben genannten, veränderten Parameter das Ruheniveau wieder eingenommen und in der anschließenden 30-minütigen Erholungsphase wurden keine Veränderungen mehr registriert.

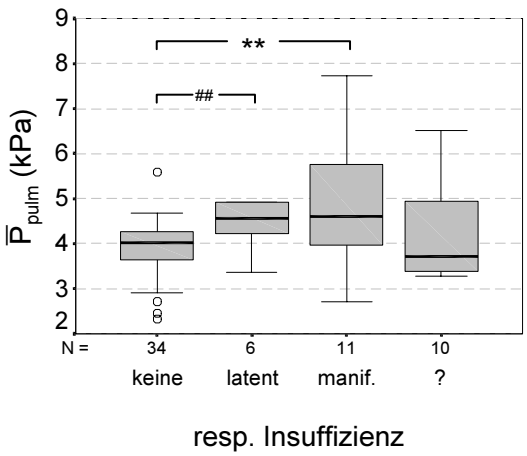

*Abb. 70: Ruhewerte des mittleren Blutdrucks in der A. pulmonalis bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz (U-Test: ##P = 0,041 bzw. **P = 0,039).*

Für ΔP_{pulm} wurden weder in Ruhe noch nach der Belastung für Kälber mit latenter, manifester und fraglicher respiratorischer Insuffizienz Abweichungen von den Werten der Referenzgruppe ermittelt.

In den Gruppen der Kälber mit Symptomen einer **latenten** bzw. **manifesten** respiratorischen Insuffizienz konnte ein statistisch signifikant höherer $\overline{P}_{pulm}$-Ruhewert (Mann-Whitney-Test: P = 0,041 bzw. P = 0,039) als in der Referenzgruppe nachgewiesen werden (Abb. 70). Die Verläufe von $P_{pulm,dia}$ bei Kälbern mit Symptomen einer **latenten** respiratorischen Insuffizienz waren nicht einheitlich (Abb.71). Der Anstieg von $P_{pulm,sys}$ war tendenziell höher als der der Referenzgruppe (Abb. 71). Somit konnte bei diesen Tieren am Belastungsende ein tendenzieller Anstieg von $\overline{P}_{pulm}$ um 1,31 ±1,77 kPa registriert werden.

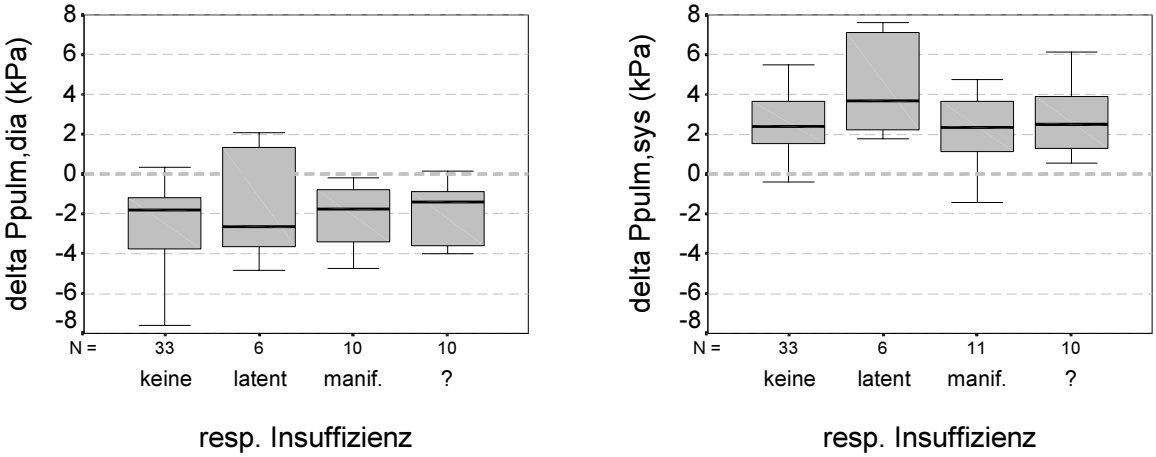

Abb. 71: Änderung des diastolischen (linke Grafik) und des systolischen (rechte Grafik) Blutdrucks in der A. pulmonalis am Belastungsende (d. h. Differenz zum Ruhewert) bei Kälbern ohne sowie mit latenter, manifester bzw. fraglicher respiratorischer Insuffizienz.

4.11. Körpertemperatur

Sowohl die gesunden Kälber als auch diejenigen mit Symptomen einer respiratorischen Erkrankung wiesen am Versuchstag im Stall eine statistisch signifikant niedrigere

Rektaltemperatur (**T**) von 38,91 ± 0,52 °C auf als in Ruhe auf dem Laufband mit 39,38 ± 0,44 °C (Wilcoxon-Test: P < 0,001; Abb. 70).

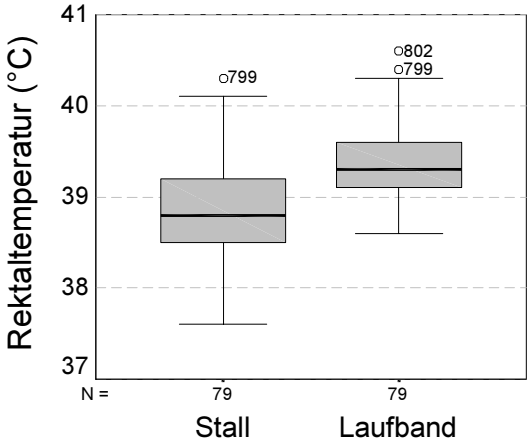

Abb. 70: Körpertemperatur am Versuchstag im Stall und bei körperlicher Ruhe auf dem Laufband bei allen 79 Belastungstests (Wilcoxon-Test: P < 0,001).

Die Rektaltemperatur stieg bei 21 der 27 Belastungstests des Status **Ia** unter ergometrischer Belastung an. Dieser Anstieg zum Belastungsende von 39,22 ± 0,29 °C in Ruhe auf 39,39 ± 0,27 °C war statistisch signifikant (Wilcoxon-Test: P < 0,05) und setzte sich bis 30 min nach Belastungsende auf 39,49 ± 0,35 °C fort. Bei den Kälbern des Status **Ib** traten keine signifikanten Veränderungen auf.

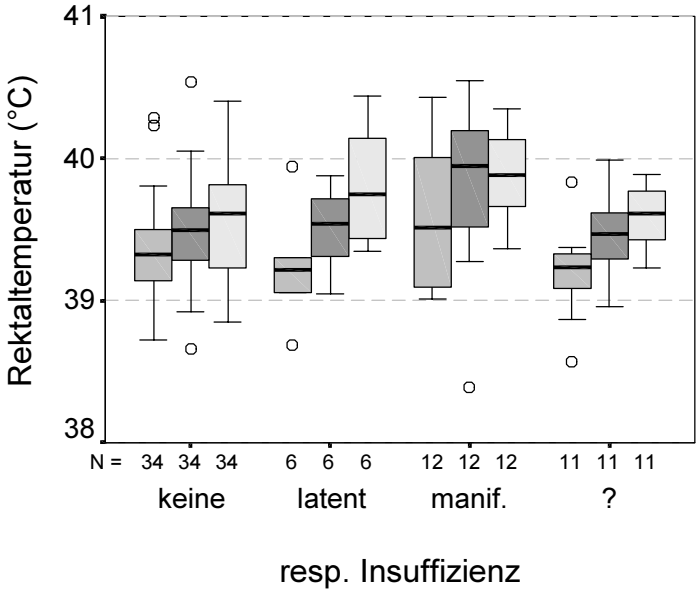

Abb. 71: Rektaltemperatur in Ruhe (mittelgraue Boxplots), am Belastungsende (dunkelgraue Boxplots), sowie 30 min nach der Belastung (hellgraue Boxplots) bei keiner, latenter, manifester sowie fraglicher respiratorischer Insuffizienz (Statistik siehe Text).

Auch bei den Kälbern mit **latenter, manifester** sowie **fraglicher** respiratorischer Insuffizienz trat zum Belastungsende ein signifikanter Anstieg von T auf (Wilcoxon-Test: P < 0,05; Ausnahme Kalb Nr. 849 Status V), der sich bei den Kälbern mit latenter respiratorischer Insuffizienz bis 30 min nach Belastungsende fortsetzte (Abb. 71). Die Kälber mit manifester respiratorischer Insuffizienz wiesen mit 39,58 ± 0,49 °C einen tendenziell höheren Ruhe-Ausgangswert als die Referenzgruppe Ia auf (Mann-Whitney-Test: P = 0,18).