

3. ERGEBNISSE

Das Hauptziel dieser Studie war die Bestimmung von Höhen- und Trainingseffekten auf die Erythropoese bei Frauen. Dazu wurden Veränderungen der Hb-Masse, der Indikatoren der Erythropoese und des Eisenstoffwechsels vor allen bei jungen Frauen aus verschiedenen Höhen (35, 960 und 2 600 m über N.N.) und mit unterschiedlicher Leistungsfähigkeit untersucht. Um festzustellen, inwieweit vorübergehende Aufenthalte in größeren Höhen als 2 600 m die untersuchten Kenngrößen beeinflussen, wurde außerdem eine kleine Gruppe von semi-trainierten Bergsteigerinnen aus Bogotá mit Sportlerinnen ähnlicher Leistungsfähigkeit aus Bogotá und Berlin verglichen. Da die weiblichen Hormone einen Effekt auf die Atmung besitzen, wurden schließlich die Werte junger Frauen mit Ergebnissen postmenopausaler Frauen verglichen, bei denen der Einfluss von Östrogenen und Gestagenen fehlt.

3.1. Höhen- und Trainingseffekt bei jungen Frauen

3.1.1. Anthropometrie

Die Tabelle 3.1 zeigt die anthropometrischen Daten für junge Frauen. Die deutschen Frauen waren im allgemeinen größer und schwerer als die kolumbianischen. Der BMI, also das Verhältnis von Körpergewicht zum Quadrat der Größe war für alle Gruppen sehr ähnlich. In Gegensatz dazu nimmt der Fettanteil (%) mit dem Training ab.

Tabelle 3.1 Anthropometrie und Leistungsfähigkeit von jungen Frauen

	n	Alter Jahr	Gewicht kg	Grösse cm	BMI kg·m ⁻²	Fett %	VO ₂ max _u ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	VO ₂ max _k ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	
UT	Berlin	15	24.8 ± 1.0	61.5 ± 1.4	169.0 ± 1.0	21.7 ± 0.4	23.9 ± 1.2	37.8 ± 0.7	33.3 ± 0.6
	Cali	14	20.4 ± 1.1	53.5 ± 1.7 ^a	159.0 ± 4.0	22.4 ± 0.9	21.6 ± 0.7	34.0 ± 1.0	29.9 ± 0.9
	Bogotá	19	19.9 ± 0.8	58.0 ± 1.5	160.0 ± 1.0	22.6 ± 0.5	22.2 ± 0.8	27.1 ± 1.0	27.1 ± 1.0 ^{aa}
ST	Berlin	46	22.6 ± 0.6	61.9 ± 1.0	169.0 ± 1.0	21.6 ± 0.2	21.1 ± 0.6	44.7 ± 0.6	38.2 ± 0.4 ^{bb}
	Bogotá	22	23.1 ± 0.7	54.2 ± 1.4 ^{aa}	158.0 ± 1.0	21.7 ± 0.4	18.1 ± 1.0	34.6 ± 1.0	34.6 ± 1.0 ^{a,bb}
AT	Berlin	12	23.2 ± 1.7	53.3 ± 1.6 ^b	166.0 ± 2.0	19.5 ± 0.6	16.8 ± 1.5 ^{bb}	54.6 ± 1.3	44.6 ± 1.0 ^{bb}
	Cali	5	26.6 ± 2.8	55.2 ± 3.0	155.0 ± 2.0	21.2 ± 0.5	16.4 ± 1.9 ^{bb}	55.2 ± 1.8	45.2 ± 1.5 ^{bb}
	Bogotá	16	24.6 ± 1.6	54.2 ± 1.7 ^{bb}	159.0 ± 1.0	21.4 ± 0.5	16.1 ± 1.6 ^{bb}	44.1 ± 0.9	44.1 ± 0.9 ^{bb}
Anova			aa bb	aa		bb		a bb	

Mittelwert und Standardfehler von Messungen bei untrainierten (UT), semitrainierten (ST) und ausdauertrainierten (AT) Teilnehmerinnen aus Berlin, Cali und Bogotá. Die VO₂max bei Tieflandbewohnerinnen (Berlin und Cali) wurde auf 2600 m Höhe korrigiert (VO₂max_k). Unkorrigierte Werte (VO₂max_u) werden ohne Signifikanzniveaus dargestellt. Bei den UT und den ST in Bogotá konnte der VO₂max-Test nur bei je 13 Personen durchgeführt werden. Anova (letzte Zeile) und t-Test nach Bonferroni-Korrektur bzw. Tamhane-Test für den Höheneffekt mit p<0.05 (a), p<0.01 oder kleiner (aa), und für den Trainingseffekt mit p<0.05 (b), p<0.01 oder kleiner (bb). Zum paarweisen Vergleich werden Signifikanzniveaus von Berlin zu den anderen Höhen und von den UT zu den anderen Trainingszuständen angezeigt.

Dieser Effekt ist beim Vergleich der AT- mit den UT-Frauen besonders deutlich erkennbar. Die Varianzanalyse zeigt einen hoch signifikanten Unterschied ($p < 0.001$) zwischen den unterschiedlichen Trainingszuständen. Der Fettanteil von Frauen unterschiedlicher Herkunft wies bei gleichem Trainingszustand keinen Unterschied auf. Bei ST-Frauen aus Berlin war der Fettanteil um 3.0% höher gegenüber Frauen aus Bogotá, dieser Unterschied war aber nicht signifikant. Der ähnliche BMI aller Gruppen bei signifikant unterschiedlichem Fettanteil ist ein Zeichen dafür, wie wenig repräsentativ der BMI für die anthropometrische Zusammensetzung ist.

3.1.2. Maximale aerobe Leistungsfähigkeit ($VO_2\max$)

Trotz der vorgenommenen Korrektur für die Höhe blieben bei UT- und ST-Frauen noch signifikante höhenbedingte Unterschiede bestehen ($p < 0.001$). Frauen aus Berlin sind leistungsfähiger als Frauen aus Bogotá (jeweils um 6.2 und 3.4 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ bei der $VO_2\max$), aber nicht signifikant leistungsfähiger als UT-Frauen aus Cali (Tab 3.1).

3.1.3. Ernährungsauswertung

Die Tabelle 3.2 zeigt die Zufuhr der Nahrungsbestandteile bei den befragten Frauen aus Bogotá. Eine Mangelernährung wird normalerweise erst angenommen, wenn die Deckung eines Nahrungsanteils unter 90% des Bedarfs liegt. UT-Frauen decken den Bedarf an Kohlenhydraten (KH), Kalorien, Fett und Eisen nicht. Der Mangelanteil bei diesen Nahrungsbestandteilen ist erheblich. Allein mit Eiweiß sind sie ausreichend versorgt. Die ST-Frauen haben einen leichten Mangel an Eiweiß, KH, Eisen und Kalorien, und der Anteil an Frauen, die den Bedarf an diesen Nahrungsbestandteilen nicht decken, liegt zwischen 47 und 60 %.

Tabelle 3.2. Ernährungsauswertung bei Frauen aus Bogotá.

	n	Eiweiß	KH	Fett	Kalorien	Eisen
UT	14	105 ± 8	71 ± 6	69 ± 6	75 ± 6	72 ± 4
		14	50	86	71	64
ST	15	87 ± 9	79 ± 7	114 ± 11	86 ± 8	89 ± 9
		53	60	27	53	47
AT	12	93 ± 9	87 ± 6	84 ± 10	85 ± 6	110 ± 13
		42	67	58	67	33

Zufuhr einiger Nahrungsbestandteile (Prozentsatz des Bedarfs Mittelwerte ± Standardfehler) und Anteil der Mangelernährten (%) bei untrainierten (**UT**), semitrainierten (**ST**) und ausdauertrainierten (**AT**) Frauen aus Bogotá.

Die AT-Frauen weisen den besten Ernährungszustand auf. Der Bedarf an Eiweiß und Eisen ist vollkommen gedeckt. Mit Kalorien, Kohlenhydraten und Fetten sind sie nur geringfügig unterversorgt.

3.1.4. Arterielle Sättigung und Hämatologische Messungen

Die arterielle Sauerstoffsättigung (SaO_2) und die Hämatologische Werte wie [Hb], Hkt und mittlere korpuskuläre Hämoglobin-Konzentration (MCHC) im venösen Blut sind in der Tabelle 3.3 dargestellt. Unabhängig vom Trainingszustand war die SaO_2 wegen des geringeren Luftdrucks in Bogotá erwartungs-gemäß signifikant niedriger als in Cali (-2.6%, $p < 0.01$) und in Berlin (-3.2%, $p < 0.01$). Vergleicht man die SaO_2 bei gleicher Höhe, dann ergibt sich kein trainingsbedingter Unterschied. Die [Hb] und der Hkt ändern sich gleichsinnig, nämlich zu höheren Werten in der Höhe und zu niedrigeren mit dem Training.

Tabelle 3.3. Hämatologische Messungen und Hb-Masse bei jungen Frauen

		n	SaO_2 %	[Hb] $\text{g}\cdot\text{dl}^{-1}$	Hkt %	MCHC $\text{g}\cdot\text{dl}^{-1}$	Hb-Masse $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Hb-Masse $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (ffM)
UT	Berlin	15	96.8 ± 0.4	12.9 ± 0.2	37.6 ± 0.6	34.5 ± 0.3	9.5 ± 0.3	12.1 ± 0.4
	Cali	14	96.2 ± 0.2	13.1 ± 0.2	39.8 ± 0.6^a	32.9 ± 0.3^{aa}	8.9 ± 0.2	11.3 ± 0.2
	Bogotá	19	93.3 ± 0.2^{aa}	14.3 ± 0.2^a	42.9 ± 0.6^{aa}	33.3 ± 0.3^{aa}	9.1 ± 0.2	11.7 ± 0.3
ST	Berlin	46	96.9 ± 0.1	12.7 ± 0.1	36.6 ± 0.4	34.7 ± 0.2	9.8 ± 0.1	12.9 ± 0.2
	Bogotá	22	94.0 ± 0.2^{aa}	14.1 ± 0.2^{aa}	42.4 ± 0.6^{aa}	33.3 ± 0.2^{aa}	9.9 ± 0.3	12.0 ± 0.4
AT	Berlin	12	97.4 ± 0.1	12.5 ± 0.2	37.2 ± 0.6	34.4 ± 0.4	11.6 ± 0.3^{bb}	14.0 ± 0.3^b
	Cali	5	96.5 ± 0.2	12.9 ± 0.2	39.0 ± 0.6	33.2 ± 0.5	10.8 ± 0.1^b	13.0 ± 0.2
	Bogotá	16	93.8 ± 0.1^{aa}	13.8 ± 0.2	42.8 ± 0.6^{aa}	32.3 ± 0.3^{aa}	11.6 ± 0.3^{bb}	14.2 ± 0.5^{bb}
Anova			aa	aa bb	aa bb	aa	bb	bb

Mittelwerte und Standardfehler von Messungen an untrainierten (UT), semitrainierte (ST) und ausdauertrainierten (AT) jungen Frauen aus Berlin, Cali und Bogotá. Die Hb-Masse ist bezogen auf Körpergewicht und fettfreies Körpergewicht (ffM). Symbole für die Statistik wie in Tabelle 3.1.

Im Durchschnitt haben Frauen aus Bogotá gegenüber Frauen aus Berlin und Cali $1.3 \text{ g}\cdot\text{dl}^{-1}$ bzw. $1.1 \text{ g}\cdot\text{dl}^{-1}$ mehr Hämoglobin. Bildet man den Mittelwert für alle Frauen mit gleichem Trainingszustand, findet man einen signifikanten Höheneffekt von etwa 10% (Anova $p < 0.01$). Die MCHC bei Frauen mit vergleichbarem Trainingszustand war bei den Gruppen aus Bogotá systematisch erniedrigt (signifikant bei UT und ST). Das Training weist dagegen keine Wirkung auf die MCHC auf.

3.1.5. Die Hb-Masse

Die Ergebnisse für die Hb-Masse sind in Tabelle 3.3 aufgeführt. Überraschend hat der Höhenunterschied (im Gegensatz zum Trainingszustand) keine Auswirkungen auf die Hb-Masse. Die Werte der Gruppen mit vergleichbarem Trainingszustand aus Bogotá waren nicht höher als der Frauen aus Berlin und Cali. Dagegen haben unabhängig von der Höhe AT-Frauen gegenüber ST- und UT-Frauen im Durchschnitt $1.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p<0.01$) und $2.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p<0.001$) mehr Hämoglobin. ST-Frauen haben wiederum $0.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ mehr ($p<0.001$) als UT-Frauen. Hb-Masse und [Hb] ändern sich bei Training in entgegengesetzte Richtungen. AT-Frauen besitzen die niedrigste [Hb], aber die höchste Hb-Masse. Da der geringere Fettanteil von ausdauertrainierten Probandinnen die Ergebnisse der Hb-Masse-Bestimmung verfälschen könnte, wurde die Hb-Masse auch bezogen auf fettfreies Körpergewicht berechnet. Nach dieser Berechnung verringern sich die Unterschiede zwischen AT- und UT-Frauen, der signifikante Trainingseffekt bleibt jedoch erhalten.

3.1.6. Blutvolumina

Die Tabelle 3.4 fasst den Effekt der Hauptfaktoren auf die Blutvolumina aller jungen Teilnehmerinnen zusammen. Aufgrund der großen Anzahl von Gruppen ist die Darstellung der Daten unübersichtlich, daher werden zur Verdeutlichung des Effektes von Höhe und Training auf die Blutvolumina nur die Ergebnisse bei bestimmten Gruppen abgebildet. Für alle Gruppen wird jedoch Bezug auf die Ergebnisse der Tabelle 3.4 genommen.

Wie die Hb-Masse zeigt das EV keine eindeutige Veränderung bezüglich der Höhe. Wegen der niedrigeren MCHC in der Höhe gleichen sich bei den UT-Frauen die Mittelunterschiede, die bei der Hb-Masse zu sehen sind, beim EV an. Das PV sinkt dagegen in größeren Höhen signifikant. Höhe führt auch zu einer Abnahme des BV, weil das PV sinkt (Anova, $p<0.001$, Tab. 3.4). Obwohl das Training eine eindeutige PV-Vergrößerung verursacht, erreichen Frauen aus Bogotá nicht die Werte derjenigen aus Berlin. Das Mittel aller Frauen in Berlin liegt über dem der Frauen aus Cali mit $+5.0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p<0.01$) und Bogotá mit $+9.5 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p<0.001$, Tab 3.4). Die Werte in Cali liegen zwischen den Ergebnissen von Berlin und Bogotá. Bei den Einzelgruppen sieht man einen signifikanten Effekt der Höhe auf das BV nur bei ST-Frauen (Tab. 3.4), dies aufgrund des großen Unterschieds im PV und der hohen Personenzahl. Bei UT- und AT-Frauen sind die höhenbedingten Unterschiede nicht signifikant. Abbildung 3.3 verdeutlicht die Wirkung der Höhe auf die Blutvolumina untrainierter Frauen.

Tabelle 3.4 Blutvolumina bei jungen Frauen.

		n	EV ml·kg ⁻¹	PV ml·kg ⁻¹	BV ml·kg ⁻¹
UT	Berlin	15	27.0 ± 0.8	52.0 ± 1.3	79.1 ± 1.9
	Cali	14	27.1 ± 0.8	47.4 ± 1.0	74.5 ± 1.5
	Bogotá	19	27.1 ± 0.6	42.9 ± 1.6 ^{aa}	70.0 ± 2.1
ST	Berlin	46	28.4 ± 0.4	57.1 ± 0.8	85.5 ± 1.1
	Bogotá	22	29.7 ± 0.8	47.5 ± 2.0 ^{aa}	77.3 ± 2.7 ^{aa}
AT	Berlin	12	34.0 ± 0.7 ^{bb}	66.4 ± 1.5 ^{bb}	100.4 ± 1.9 ^{bb}
	Cali	5	32.7 ± 0.5 ^{bb}	59.5 ± 1.8 ^{bb,aa}	92.2 ± 2.1 ^{bb}
	Bogotá	16	35.9 ± 0.9 ^{bb}	56.5 ± 1.8 ^{bb,aa}	92.4 ± 2.6 ^{bb}
Anova			bb	aa bb	aa bb

Mittelwert und Standardfehler von Erythrozyten- (EV), Plasma- (PV) und Blutvolumen (BV) bei jungen Frauen aus Berlin, Cali und Bogotá. Symbole für die Statistik wie in Tabelle 3.1

Training vergrößert die Volumina des Blutes. Dabei steigt das EV mit verbessertem Trainingszustand signifikant an, analog zur Hb-Masse. Das EV ist bei AT-Frauen gegenüber UT-Frauen um 7.2 ml·kg⁻¹ (p<0.001) und gegenüber ST-Frauen um 5.2 ml·kg⁻¹ (p<0.01) vergrößert. Wenn alle Höhen gemittelt werden, verfügen AT-Frauen auch über ein größeres PV gegenüber UT-Frauen (+13.4 ml·kg⁻¹, p<0.001) und ST-Frauen (+8.5 ml·kg⁻¹, p<0.001).

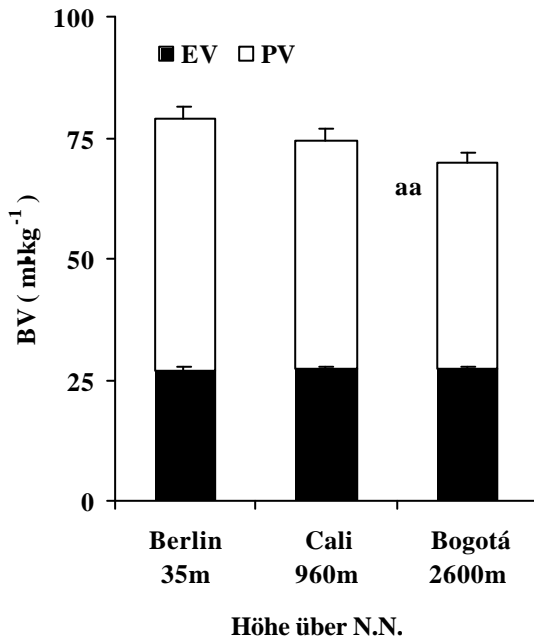


Abb. 3.3 Mittelwert und Standardfehler von Erythrozyten- (EV schwarze Balken) und Plasmavolumen (PV weiße Balken) (Blutvolumen BV weiße + schwarze Balken) bei UT-Frauen aus verschiedenen Höhen über N.N. t-Test nach Bonferroni-Korrektur bzw. Tamhane-Test für den Höheneffekt mit p<0.01 (aa) zwischen Bogotá und Berlin.

Signifikante Unterschiede findet man zwischen Untrainierten und Semitrainierten nur, wenn eine Gesamtgruppe aus Frauen verschiedener Höhenlagen gebildet wird. Auf diese Weise besitzen ST-Frauen ein höheres PV und EV (p<0.01) als UT-Frauen. Als Beispiel für den Trainingseffekt auf die Blutvolumina werden die Frauen aus Bogotá in der Abbildung 3.4 dargestellt.

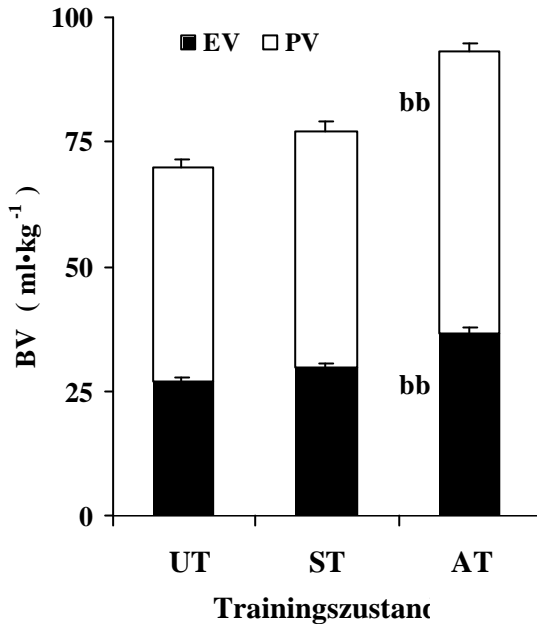


Abb. 3.4. Mittelwerte und Standardfehler von Erythrozyten- (EV) und Plasmavolumen (PV) bei untrainierten (UT), semitrainierten (ST) und ausdauertrainierten (AT) Frauen aus Bogotá. Symbole für Volumina wie in Abb. 3.3. t-Test nach Bonferroni-Korrektur bzw. Tamhane-Test für den Trainingseffekt mit $p < 0.001$ (bb) zwischen AT- und UT-Frauen.

3.1.7. Hb-Masse, Blutvolumen und der Zusammenhang mit der $VO_2\text{max}$.

3.1.7.1. Kovarianzanalyse

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf, dass Frauen auf die Hypoxie nicht mit Vermehrung der Hb-Masse bzw. des EV reagieren. Dennoch legt der Anstieg der Hb-Masse und der Blutvolumina mit dem Training und der signifikante Unterschied für die $VO_2\text{max}$ zwischen Bogotanerinnen und Berlinerinnen bei den UT und ST-Frauen (Tab. 3.1) nahe, dass der Höheneffekt sich unter der schwachen Leistungsfähigkeit der erwähnten Gruppen versteckt.

Tabelle 3.5. Korrektur der Hb-Masse für den Einfluss der $VO_2\text{max}$.

Höhe über N.N.	Hb-Masse $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Berlin (35 m)	$9.9 \pm 0.1^{\text{aa}}$
Cali (960 m)	$9.7 \pm 0.2^{\text{a}}$
Bogotá (2600 m)	10.4 ± 0.2

Korrigierte Werte der Hb-Masse nach Kovarianzanalyse. † Test für den Höheneffekt gegenüber Bogotá (2 600 m) mit $p < 0.05$ (a) und mit $p < 0.01$ (aa).

Um den Höheneffekt ohne Interferenz der Leistungsfähigkeit zu untersuchen, wurden die Daten durch ein statistisches Verfahren (Kovarianzanalyse) mit der $VO_2\text{max}$ auf 2 600 m über N.N. als Kovariate überprüft. Dabei wird für alle Probandinnen die Leistungsfähigkeit auf die gleiche mittlere $VO_2\text{max}$ gesetzt, dann erfolgt die Berechnung von korrigierten Wer-

ten für Hb-Masse und EV (Tab 3.5). Nach dieser Korrektur bestand in der Hb-Masse kein Unterschied zwischen 35 m und 960 m über N.N. Aufgrund dieser statistischen Ähnlichkeit wurden beide Gruppen bei den folgenden Regressionsanalysen zusammengefasst.

Die Hb-Masse bei den Bogotanerinnen ist laut Kovarianzanalyse um 6.7% gegenüber den Frauen aus dem Tiefland (Berlin-Cali) signifikant erhöht ($p < 0.01$, Tab. 3.5); auch die Einzelvergleiche sind signifikant verschieden. Wenn man die Laufband-Werte bei diesem statistischen Verfahren nicht berücksichtigt, ist der Unterschied zwischen Tiefland und Hochland 7.3%. Diese geringfügige Änderung spricht dafür, dass die vorgenommene Korrektur der $VO_2\text{max}$ für die unterschiedlichen Belastungsprotokolle (Laufband und Fahrradergometer) richtig ist.

3.1.7.2. Regressionsanalyse

Während im vorherigen Abschnitt die $VO_2\text{max}$ als Maß der aeroben Leistungsfähigkeit für die Größe der Hb-Masse als Korrekturgröße eingeführt wurde, kann man auch umgekehrt die Abhängigkeit der $VO_2\text{max}$ von einigen wichtigen Parametern, nämlich der Hb-Masse oder auch dem Blutvolumen, prüfen.

In der Abbildung 3.5 ist der Zusammenhang zwischen $VO_2\text{max}$ und Hb-Masse dargestellt, wenn alle Probandinnen aus Bogotá sowie aus Berlin und Cali jeweils zusammengefasst werden. Die Leistungsfähigkeit lässt sich in beiden Gruppen mit der Hb-Masse gut korrelieren, allerdings ist der Korrelationskoeffizient bei der Bogotá-Gerade etwa größer. Bei den Höhenbewohner benötigt die Erhöhung der $VO_2\text{max}$ um $1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ $0.25 \text{ g Hb}\cdot\text{kg}^{-1}$; bei den Tieflandbewohnern $0.30 \text{ g Hb}\cdot\text{kg}^{-1}$ (bezogen auf die $VO_2\text{max}$ auf 2 600 m Höhe). Die Gleichungen bei den Tieflandbewohnerinnen sowohl für die Hb-Masse als auch für das Blutvolumen ändern sich nicht erheblich, wenn die Regression nur mit der $VO_2\text{max}$ von Frauen, die auf dem Fahrradergometer belastet wurden, berechnet wird ($VO_2\text{max} = 3.7\text{Hb} + 0.60$, $r = 0.65$, $p < 0.001$; $VO_2\text{max} = 0.45\text{BV} - 0.06$, $r = 0.63$, $p < 0.001$).

Wenn die Beziehung der $VO_2\text{max}$ zu der Hb-Masse bei den Trainingszuständen einzeln geprüft wurde, ergaben sich signifikante und positive Korrelationen bei ST- und AT-Frauen, ein Verhalten, dass bei den UT-Frauen nicht zu beobachten war. Im niedrigen Leistungsbereich liegen beide Regressionsgeraden auseinander, aber mit zunehmender Leistungsfähigkeit verringert sich der Abstand zwischen den Höhen, so dass die Geraden sich bei einer $VO_2\text{max}$ von ca. $48 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ und einer Hb-Masse von $13.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ schneiden.

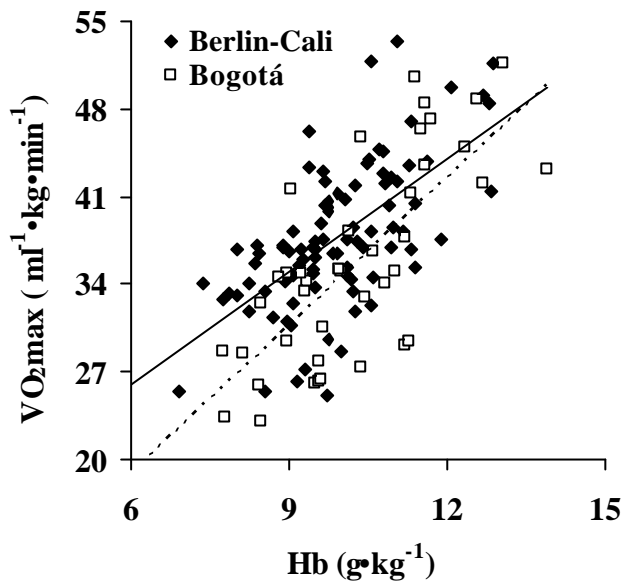


Abb. 3.5. Zusammenhang der höhenkorrigierten $VO_2\max$ mit der Hb-Masse bei jungen Frauen aus dem Tiefland (Cali-Berlin, $VO_2\max=3.0\text{ Hb}+8.0$, $r=0.63$, $p<0.001$, durchgezogene Linie) und aus dem Hochland (Bogotá, $VO_2\max=3.93\text{ Hb}-4.64$, $r=0.73$, $p<0.001$, gestrichelte Linie).

Trägt man statt der Hb-Masse das Blutvolumen auf, verbessern sich die Korrelationskoeffizienten leicht und die Geraden überkreuzen sich (Abb. 3.6). Für die Tieflandbewohnerinnen benötigt die Verbesserung der $VO_2\max$ um $1\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ $2.7\text{ ml Blut}\cdot\text{kg}^{-1}$ und für die Hochlandbewohnerinnen $2.2\text{ Blut}\cdot\text{kg}^{-1}$, um die gleiche Verbesserung zu erzielen.

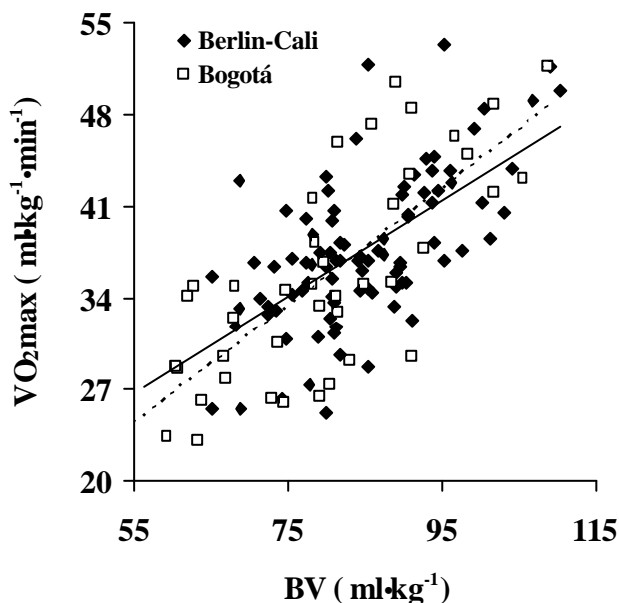


Abb. 3.6. Zusammenhang der höhenkorrigierten $VO_2\max$ mit dem Blutvolumen (**BV**) bei jungen Frauen aus dem Tiefland (Cali-Berlin, $VO_2\max=0.37\text{BV}+6.4$, $r=0.63$, $p<0.001$) und aus dem Hochland (Bogotá, $VO_2\max=0.45\text{BV}-0.60$, $r=0.75$, $p<0.001$).

Die Leistungsfähigkeit und das EV zeigen für Tiefland- und Hochlandbewohnerinnen eine signifikante und positive Korrelation, bei Frauen aus Bogotá tendieren die Regressions- und Korrelationskoeffizienten zu höheren Werten als bei Frauen aus Cali und Berlin. Die Abhängigkeit des EV von der $VO_2\max$ wird für Frauen aus den unterschiedlichen Höhen in der Abbildung 3.7 dargestellt.

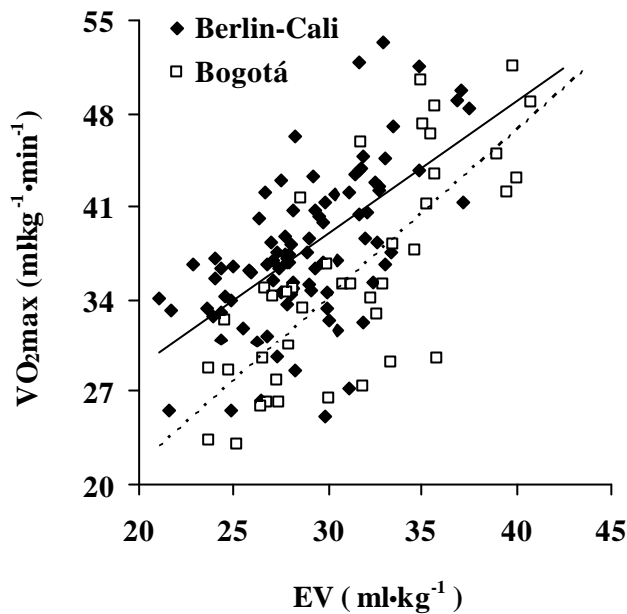


Abb. 3.7. Zusammenhang der höhenkorrigierten $VO_2\max$ mit dem Erythrozytenvolumen (**EV**) bei Frauen aus dem Tiefland (Cali-Berlin, $VO_2\max=1.0EV+8.7$, $r=0.61$, $p<0.001$, durchgezogene Linie) und aus dem Hochland (Bogotá $VO_2\max=1.26EV+3.6$, $r=0.76$, $p<0.001$, gestrichelte Linie).

Das PV weist dem gegenüber ein umgekehrtes Muster auf. Mit zunehmender $VO_2\max$ wird der Abstand zwischen den Geraden größer. Das PV korreliert auch gut mit der Leistungsfähigkeit (Abb. 3.8).

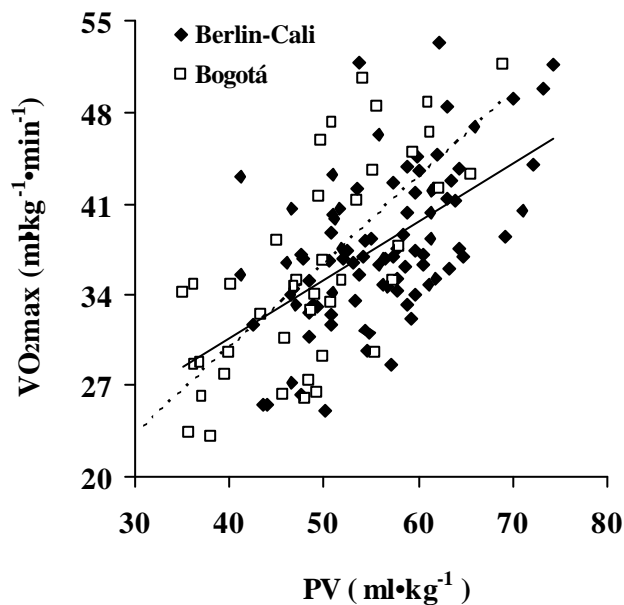


Abb. 3.8. Zusammenhang der höhenkorrigierten $VO_2\max$ mit dem Plasmavolumen (**PV**) bei Frauen aus dem Tiefland (Cali-Berlin, $VO_2\max=0.45PV+12.5$, $r=0.56$, $p<0.001$, durchgezogene Linie) und aus dem Hochland (Bogotá $VO_2\max=0.65PV+3.6$, $r=0.72$, $p<0.001$, gestrichelte Linie)

Es wurde außerdem bei jedem Trainingszustand und in jeder Höhenlage die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit ($VO_2\max$) von Hkt und von [Hb] geprüft. Kein Zusammenhang wurde zwischen diesen Blutwerten und der $VO_2\max$ nachgewiesen. Möglicherweise versteckt die gegensätzliche Änderung vom Hkt und [Hb] durch Höhe und Training die Beziehung mit der Leistungsfähigkeit.

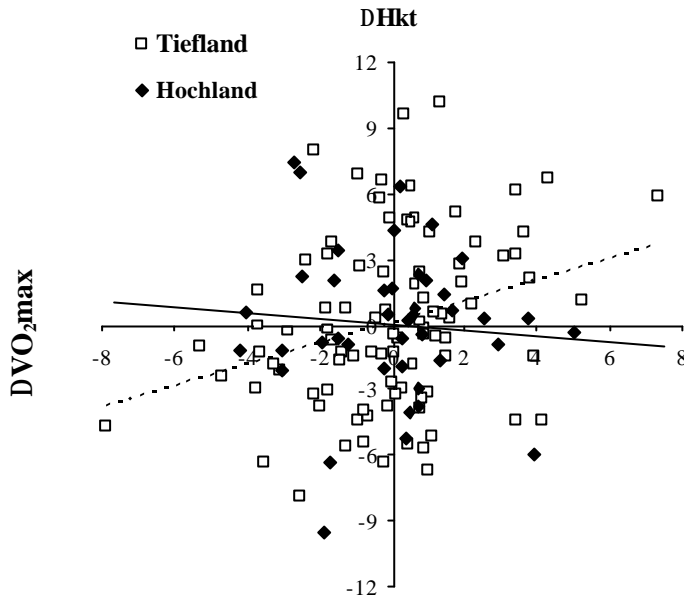


Abb. 3.9 Zusammenhang zwischen $\Delta\text{VO}_2\text{max}$ und ΔHkt für das Tiefland ($\Delta\text{Hkt}=0.5 \Delta\text{VO}_2\text{max}$, $r=0.31$, $p<0.01$, gestrichelte Linie) und für das Hochland ($\Delta\text{Hkt}=\Delta\text{VO}_2\text{max}\cdot 0.2$, $r=0.08$, nicht signifikant, durchgezogene Linie).

Um diese Variabilität zu reduzieren, wurden die Differenzen von jedem Einzelwert zum Mittelwert für jede Einzelgruppe gebildet (ΔHkt bzw. $\Delta[\text{Hb}]$) und gegen die entsprechenden VO_2max -Differenzen ($\Delta\text{VO}_2\text{max}$) aufgetragen. Eine positive Korrelation zwischen ΔHkt und $\Delta\text{VO}_2\text{max}$ bestand nur bei Frauen aus dem Tiefland (Berlin-Cali), nicht aber für die Teilnehmerinnen aus dem Hochland (Bogotá, Abb. 3.9).

3.1.8. Indikatoren der Erythropese

Die Indikatoren der Erythropese sowie des Eisenstoffwechsel sind in der Tabelle 3.6 aufgeführt. Die Zunahme von EPO mit der Höhe war unabhängig von Trainingszustand gering, aber signifikant (Anova $p<0.01$). Es ist auffällig, dass Frauen aus Cali so hohe Werte wie die Frauen aus Bogotá aufweisen. Der Einzelvergleich ergab einen signifikanten Unterschied (t-Test $p<0.05$) nur zwischen den Semitrainierten. Training dagegen übt keinen Einfluss auf die EPO-Aktivität aus.

Der Höheneffekt der EPO-Aktivität spiegelt sich auch schwach in der Reticulocytenzahl wieder, aber wegen zu großer Streuung bei den Einzelgruppen lässt sich auch hier nur bei den Semitrainierten ein signifikanter Effekt feststellen.

Tabelle 3.6 Indikatoren der Erythropoese und des Eisenstoffwechsels bei jungen Frauen.

	n	EPO (U·l ⁻¹)	Retic. (%)	eASAT (U·gHb ⁻¹)	Ferritin (µg·l ⁻¹)	sTfR (ng·ml ⁻¹)	
Ref.-Werte		3.3 – 16.6	5.0 – 15.0	1.5 – 4.0	6.9 – 282.5	0.75 – 2.44	
UT	Berlin	13	7.5 ± 1.3	9.3 ± 0.7	2.8 ± 0.1	32.3 ± 5.3	1.5 ± 0.1
	Cali	14	10.0 ± 0.9	---	2.4 ± 0.1	23.0 ± 6.7	1.7 ± 0.1
	Bogotá	19	9.1 ± 0.8	8.7 ± 0.9	2.5 ± 0.1	40.6 ± 4.7	1.7 ± 0.1
ST	Berlin	46	8.0 ± 0.7	9.8 ± 0.5	2.6 ± 0.1	22.3 ± 2.7	1.6 ± 0.1
	Bogotá	22	11.8 ± 0.9 ^a	14.3 ± 1.9 ^a	2.5 ± 0.1	22.7 ± 2.5 ^{bb}	1.7 ± 0.1
AT	Berlin	12	7.8 ± 1.1	13.1 ± 2.6	2.9 ± 0.2	25.0 ± 5.5	1.6 ± 0.2
	Cali	5	10.9 ± 0.6	---	3.0 ± 0.4	22.7 ± 2.5	1.4 ± 0.2
	Bogotá	16	10.5 ± 1.1	13.5 ± 1.8	3.0 ± 0.2	27.1 ± 5.6	1.9 ± 0.1
Anova		aa	a b	b	b		

Mittelwerte und Standardfehler von Erythropoetin-Aktivität (**EPO**), Reticulocytenzahl pro 1000 Zellen (**Retic.**), erythrocytäre Aspartat Aminotransferase-Aktivität (**eASAT**) und löslichem Transferrin-Rezeptor (**sTfR**) bei untrainierten, (**UT**), semitrainierten (**ST**) und ausdauertrainierten (**AT**) jungen Frauen aus Berlin, Cali und Bogotá. Referenz-Werte für Gesunde stammen bei EPO, Ferritin und sTfR von Kit-Herstellern und bei Reticulocyten und eASAT aus der Literatur. Wegen technischer Probleme konnten die Reticulocyten in der Cali-Stichprobe nicht gemessen werden. Symbole für die Statistik wie in Tabelle 3.1.

Dagegen wies die gesamte AT-Gruppe in der Reticulocytenzahl eine Differenz zu der UT-Gruppe von 33.5% (t-Test $p < 0.05$) auf. Die eASAT-Aktivität wird nicht durch die Höhenlage, aber wohl durch das Training beeinflusst. Dies zeigt auch die schwache, aber signifikante Korrelation mit der Leistungsfähigkeit (Abb. 3.10).

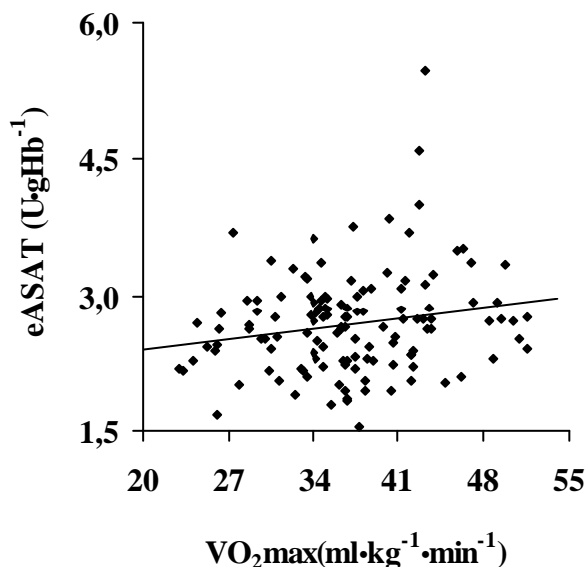


Abb. 3.10. Zusammenhang zwischen $VO_2\max$ und eASAT-Aktivität bei jungen Frauen im Tiefland und Hochland. $eASAT = 0.02VO_2\max + 2.1$, $r = 0.19$, $p < 0.03$.

Die Zunahme der eASAT-Aktivität bei jüngeren Erythrocyten (Schmidt, 1984) lässt sich ein enger Zusammenhang zwischen der Reticulocytenzahl und der eASAT-Aktivität vermutet, aber dieser wurde nicht bewiesen (Abb. 3.11).

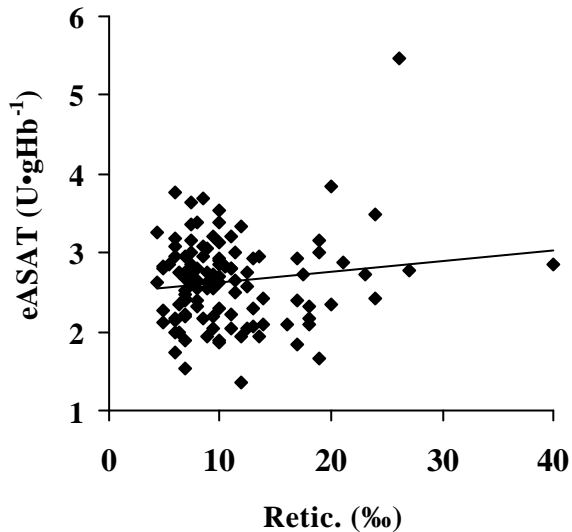


Abb. 3.11. Zusammenhang zwischen eASAT-Aktivität und Retikulozytenzahl bei jungen Frauen im Tiefland und Hochland. $eASAT=0.01Retic+2.50$.

3.1.9. Indikatoren des Eisenstoffwechsels

3.1.9.1. Überprüfung von Eisenmangelfällen

Frauen, die eine [Hb] niedriger als $12.0 \text{ g}\cdot\text{dl}^{-1}$ im Tiefland und $13.5 \text{ g}\cdot\text{dl}^{-1}$ im Hochland (Sarasti 1987) aufwiesen, wurden anhand der Eisenindikatoren (Ferritin und sTfR) auf Eisenmangel überprüft. Dabei wurden die Haupteffekte Höhe und Training als mögliche Ursache für Abweichungen von Normalwerten berücksichtigt. Das Training führt wie erwähnt, zu Erniedrigung von Hkt-Wert und [Hb], dabei kann der Ferritinspiegel abfallen und die sTfR-Konzentration ansteigen. Andererseits haben Hochlandbewohner ca. 9.0% höhere sTfR-Konzentration als Tieflandbewohner (Allen et al 1998).

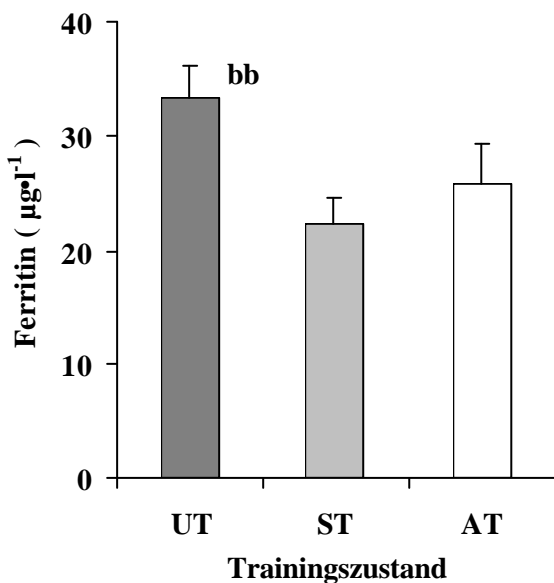


Abb. 3.12 Mittelwert und Standardfehler der Ferritin-Konzentration bei untrainierten (UT), semitrainierten (ST) und ausdauertrainierten (AT) Frauen im Tiefland und Hochland. t-Test nach Bonferroni-Korrektur bzw. Tamhane-Test für Trainingseffekt mit $p<0.01$ (bb) zu UT-Frauen.

Eisenmangel wurde angenommen, wenn 2 von 3 Indikatoren ([Hb], Ferritin- und sTfR-Konzentration) bei einer Teilnehmerin von den normalen Werten abwichen. Nach Überprüfung dieser Werte konnten wir nur bei einer ST-Frau aus Bogotá (5%), zwei UT-Frauen aus Berlin (13%) und sechs ST-Frauen aus Berlin (15%) einen leichten Eisenmangel feststellen. Die Ferritinkonzentration wird bei Frauen mit vergleichbarer Leistungsfähigkeit durch die Höhe nicht beeinflusst, zeigt jedoch eine sinkende Tendenz mit dem Training (Abb. 3.12)

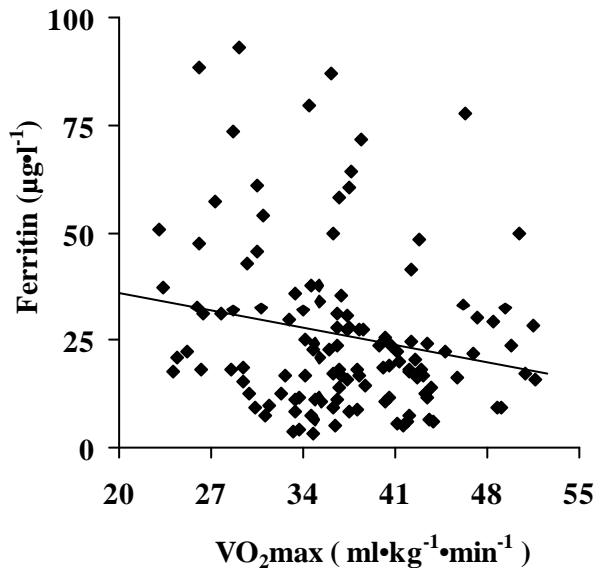


Abb. 3.13. Zusammenhang der $VO_2\max$ mit der Ferritinkonzentration bei jungen Frauen im Tiefland und Hochland. (Ferritin = $-0.61 VO_2\max + 49.0$, $r = -0.22$, $p < 0.01$).

Der Ferritin-Spiegel ist bei UT-Frauen $10.7 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (t-Test $p < 0.01$) und $8.8 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ höher als bei ST- und AT-Frauen. Die Erniedrigung der Ferritinkonzentration mit dem Training wird auch durch die Regressionsfunktion der Abbildung 3.13 verdeutlicht. Da mit zunehmender $VO_2\max$ die Ferritinkonzentration abfällt und die Hb-Masse ansteigt, wurde ein negativer Zusammenhang zwischen Hb-Masse und Ferritinkonzentration vermutet, jedoch wurde dieser nicht bestätigt.

3.1.10. Menstruationszyklus, Kontrazeptiva und Zusammenhang mit den Blutvolumina und der Hb-Masse

Bei dem folgenden Vergleich wurden nur Frauen mit vollständiger gynäkologischer Information und Gruppen mit genügender Personenzahl für die statistische Auswertung verwendet. Diese Frauengruppen und deren gynäkologische Situation sind in der Tabelle 3.7 aufgeführt.

Tabelle 3.7. Blutvolumina, Hb-Masse, Zyklusphase und Kontrazeptiva.

Gruppe	n	Zyklusphase bzw. Kontr.-Ein.	EV ml·kg ⁻¹	PV ml·kg ⁻¹	BV ml·kg ⁻¹	Hb-Masse g·kg ⁻¹	VO ₂ max ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹
UT	5	verh.	26.5 ± 1.3	49.7 ± 1.6	76.1 ± 2.6	9.4 ± 0.4	33.4 ± 1.5
	4	Follikulär	26.8 ± 1.6	51.8 ± 3.0	78.6 ± 3.8	9.5 ± 0.5	34.6 ± 0.6
	7	nicht verh.	27.5 ± 0.2	53.8 ± 0.3	81.3 ± 0.5	9.7 ± 0.1	33.3 ± 0.2
	4	Follikulär	26.8 ± 1.6	51.8 ± 3.0	78.6 ± 3.8	9.5 ± 0.5	34.6 ± 0.6
	5	verh.	26.5 ± 1.3	49.7 ± 1.6	76.1 ± 2.6	9.4 ± 0.4	33.4 ± 1.5
	7	nicht verh.	27.5 ± 0.2	53.8 ± 0.3	81.3 ± 0.5	9.7 ± 0.1	33.3 ± 0.2
Berlin	10	Follikulär	29.3 ± 0.6	57.7 ± 2.0	87.0 ± 2.5	10.1 ± 0.3	39.9 ± 1.0
	10	Luteal	27.8 ± 0.8	53.3 ± 1.0	81.1 ± 1.4	9.6 ± 0.2	38.1 ± 0.7
	12	verh.	28.5 ± 0.6	59.4 ± 1.1	88.0 ± 1.4	9.9 ± 0.2	36.7 ± 0.7
	10	Follikulär	29.3 ± 0.6	57.7 ± 2.0	87.0 ± 2.5	10.1 ± 0.3	39.9 ± 1.0
		<i>P</i>					0.01
	ST	12	verh.	28.7 ± 0.5	59.4 ± 1.1	88.0 ± 1.4	9.9 ± 0.2
	10	Luteal	27.8 ± 0.8	53.3 ± 1.0	81.1 ± 1.4	9.6 ± 0.2	38.1 ± 0.7
		<i>P</i>		0.01	0.01		
	12	verh.	28.5 ± 0.6	59.4 ± 1.1	88.0 ± 1.4	10.0 ± 0.2	36.7 ± 0.7
	20	nicht verh.	28.7 ± 0.5	56.0 ± 1.3	84.1 ± 1.7	9.9 ± 0.2	39.1 ± 0.6
		<i>P</i>					0.02
Bogotá	9	Follikulär	28.1 ± 0.9	44.9 ± 2.2	73.0 ± 2.7	9.4 ± 0.3	27.4 ± 0.8
	6	Luteal	25.8 ± 0.6	39.7 ± 2.3	65.5 ± 2.8	8.6 ± 0.3	26.9 ± 1.2
	9	Follikulär	30.7 ± 1.0	49.4 ± 2.8	80.1 ± 3.7	10.2 ± 0.4	34.4 ± 0.4
	8	Luteal	28.6 ± 1.6	44.4 ± 3.4	73.5 ± 4.8	9.6 ± 0.5	33.6 ± 1.2

Mittelwert und Standardfehler aus einer Stichprobe von untrainierten (UT) und semitrainierten (ST) Frauen aus Bogotá und Berlin verschiedener Leistungsfähigkeit und in unterschiedlicher Zyklusphase. Verhütende (verh.), nicht verhütende (nicht verh.).

Semitrainierte verhütende Frauen verfügen über größere PV und BV als Frauen in der Lutealphase (t-Test $p < 0.01$). Die Hb-Masse dieser Gruppen war sehr ähnlich. ST-Frauen in der Follikelphase hatten eine bessere VO₂max als verhütenden Frauen (t-Test $p < 0.01$). Wenn man verhütende den nicht verhütenden ST-Frauen gegenüberstellt, bleibt ein signifikanter Unterschied nur für die Leistungsfähigkeit mit niedrigerer VO₂max der verhütenden Frauen (t-Test $p < 0.02$). Aufgrund der engen Korrelation der Hb-Masse mit der VO₂max (Kapitel 3.1.7.2) wurde bei dieser Gruppe die Kovarianzanalyse eingesetzt, um zu überprüfen, ob die Korrektur der Hb-Masse-Werte mit VO₂max als Kovariate Unterschiede für Hb-Masse und Blutvolumina aufzeigt. Die korrigierten Werten waren jedoch nicht signifikant verschieden. Auch die Zusammenfassung aller verhütenden und nicht verhütenden ST- und UT-Frauen ergibt kein signifikantes Ergebnis.

3.2. Untersuchungen an Bergsteigerinnen

3.2.1. Anthropometrie und maximale aerobe Leistungsfähigkeit (VO₂max)

Eine Gruppe von Bergsteigerinnen (BS) aus Bogotá, die sich für die Messungen der Hb-Masse zu Verfügung stellte, wurde in die Studie mit einbezogen. Dank dieser Gelegenheit konnte der Einfluss von vorübergehenden Aufenthalten in größeren Höhen als 2 600 m über N.N. auf die Erythropoese untersucht werden. Diese Frauen wurden mit Sportlerinnen ähnlicher Leistungsfähigkeit verglichen, nämlich mit den ST aus Bogotá und UT aus Berlin (siehe Tab 3.1).

Tabelle 3.8 Anthropometrie und Leistungsfähigkeit von Bergsteigerinnen und Frauen ähnlicher Leistungsfähigkeit aus Bogotá und Berlin.

	n	Alter Jahr	Gewicht kg	Grösse cm	BMI kg·m ⁻²	Fett %	VO ₂ max ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹
BS	6	36.5 ± 1.6	55.6 ± 2.6	159 ± 0.2	22.1 ± 0.8	21.9 ± 1.6	34.4 ± 1.3
ST-Bog	22	23.1 ± 0.7 ^{dd}	54.2 ± 1.4	158 ± 0.1	21.7 ± 0.4	18.1 ± 1.0	34.6 ± 1.0
UT-Ber	15	24.8 ± 1.0 ^{dd}	61.5 ± 1.4 ^{dd}	169 ± 0.1 ^{dd}	21.7 ± 0.4	23.9 ± 1.2	33.3 ± 0.6
Anova		dd	dd	dd		dd	

Mittelwerte und Standardfehler von anthropometrischen Messungen an Bergsteigerinnen (**BS**), semitrainierten Frauen aus Bogotá (**ST-Bog**) und untrainierten aus Berlin (**UT-Ber**). Bei den ST-Bog konnte die VO₂max nur an 13 Personen gemessen werden. t-Test für Unterschiede von BS zu den anderen Gruppen mit p<0.01 oder kleiner (dd).

In den folgenden Tabellen werden auch die Ergebnisse der Varianzanalyse aufgeführt, jedoch können signifikante Effekte aus Unterschieden zwischen ST-Bog und UT-Ber entstehen, die im vorherigen Kapitel behandelt wurden (Höhe bzw. Training). Hier wird nur Bezug auf die Unterschiede der BS zu den anderen Gruppen genommen. Abgesehen von Alter und Größe wies der Vergleich zwischen BS und den anderen Frauen aus Bogotá und Berlin auf eine große Ähnlichkeit der anthropometrischen Kenngrößen und der VO₂max auf (Tab 3.8).

3.2.2. Arterielle Sättigung, hämatologische Messungen und Hb-Masse

Die SaO₂ ist bei den BS 2.0% und 4.8% niedriger als bei ST-Bog bzw. UT-Ber. Signifikante Unterschiede bestanden zwischen dieser Gruppe und den UT-Ber für die [Hb], den Hkt-Wert, und die MCHC (Tab. 3.9). Die Hb-Masse der BS ist um 1.4 und 1.8 g·kg⁻¹ signifikant größer (t-Test, p<0.01) als bei den ST-Bog bzw. UT-Ber. Die Berechnung der Hb-Masse bezogen auf fettfreies Körpergewicht vergrößert die Unterschiede (p<0.001) zwischen den BS und den anderen Gruppen. Wenn aber die Hb-Masse durch das Kovarianzverfahren mit der SaO₂ als Kovariate analysiert wird, sind diese Unterschiede nicht mehr vorhanden. Eine signifikant negative Korrelation zwischen der SaO₂ und der Hb-Masse wurde festgestellt (Abb. 3.14).

Tabelle 3.9. Hämatologische Messungen und Hb-Masse von Bergsteigerinnen und Frauen ähnlicher Leistungsfähigkeit aus Bogotá und Berlin.

	n	SaO ₂ %	[Hb] g·dl ⁻¹	Hkt %	MCHC g·dl ⁻¹	Hb-Masse g·kg ⁻¹	Hb-Masse (ff) g·kg ⁻¹
BS	6	92.0 ± 0.4	14.4 ± 0.2	44.7 ± 0.7	32.3 ± 0.2	11.3 ± 0.3	14.4 ± 0.5
ST-Bog	22	94.0 ± 0.2 ^{dd}	14.1 ± 0.2	42.4 ± 0.6	33.2 ± 0.2	9.9 ± 0.3 ^d	12.0 ± 0.4 ^{dd}
UT-Ber	15	96.8 ± 0.4 ^{dd}	12.9 ± 0.2 ^d	37.6 ± 0.6 ^{dd}	35.3 ± 0.3 ^{dd}	9.5 ± 0.3 ^{dd}	12.1 ± 0.4 ^{dd}

Mittelwerte und Standardfehler von Messungen an Bergsteigerinnen (**BS**), semitrainierten (**ST-Bog**) Frauen aus Bogotá und untrainierten aus Berlin (**UT-Ber**). Hb-Masse ist auf Körpergewicht und auf fettfreies Körpergewicht (**ff**) bezogen. Symbole für die Statistik wie in Tabelle 3.8.

Bei einer quadratischen Regression war der Korrelationskoeffizient deutlich höher als bei einer linearen ($r=0.44$). Die vergleichbare Leistungsfähigkeit der Gruppen ermöglichte ohne Interferenz der VO₂max die Feststellung einer SaO₂-Schwelle bei etwa 93%, ab der die Hb-Synthese als Folge der Hypoxämie deutlich stimuliert wird.

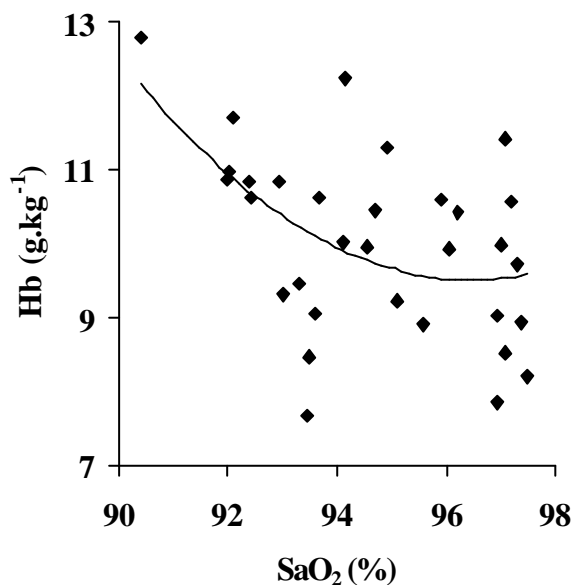


Abb.3.14. Zusammenhang zwischen der Hb-Masse und der SO₂ bei Bergsteigerinnen und Frauen mit ähnlicher VO₂max aus Bogotá und Berlin. $Hb = 0.07 (SaO_2)^2 - 14.0 (SaO_2) + 684$, $r = 0.49$, $p < 0.01$.

Auch die Abbildung 3.15 mit den Mittelwerten zeigt, dass bei ähnlicher VO₂max ein im Vergleich zu Meereshöhe erheblicher Anstieg der Hb-Masse erst erfolgt, wenn die SaO₂ unter 94% abfällt.

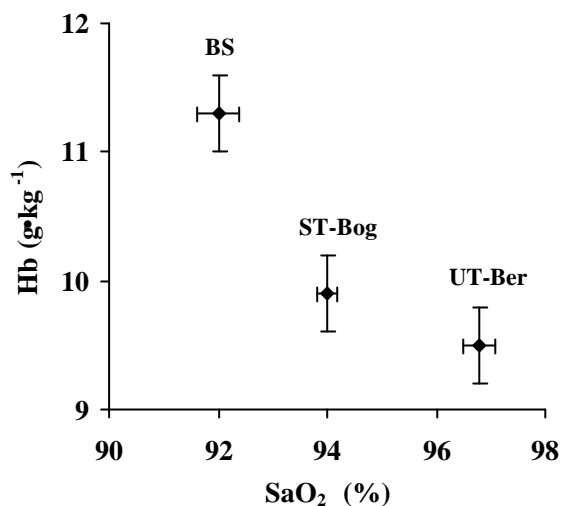


Abb. 3.15. Veränderungen der Hb-Masse in Abhängigkeit der SaO₂ bei Bergsteigerinnen (**BS**) und Frauen mit ähnlicher VO₂max, semitrainierte aus Bogotá (**ST-Bog**) und untrainierte aus Berlin (**UT-Ber**).

3.2.3. Blutvolumina

Das PV ist zwischen den Gruppen nicht unterschiedlich. Das EV der BS erreichte ein Niveau, welches signifikant höher (Anova $p < 0,001$) als das der UT-Ber und der ST-Bog ist. Dies spiegelt sich im BV wider, aber ohne eine Signifikanz zu erreichen (Abb. 3.16).

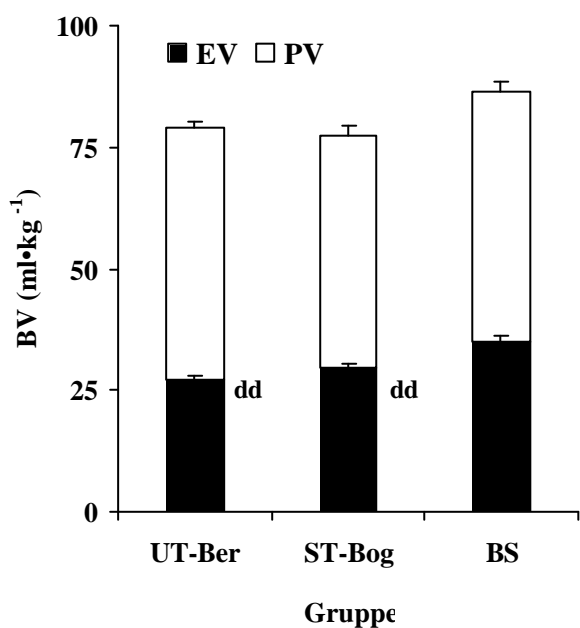


Abb. 3.16. Mittelwerte und Standardfehler von Erythrozyten- (**EV**, schwarze Balken), Plasma- (**PV**, weiße Balken) und Blutvolumen (**BV**, schwarze + weiße Balken) bei Bergsteigerinnen (**BS**), und Frauen ähnlicher Leistungsfähigkeit aus Bogotá (**ST-Bog**) und Berlin (**UT-Ber**). t -Test für die Unterschiede von den BS zu den anderen Gruppen mit $p < 0,01$ (dd).

3.2.4. Indikatoren der Erythropese und des Eisenstoffwechsels

Bei den BS wies nur eine Teilnehmerin eine subnormale Ferritinkonzentration auf, die [Hb], Hb-Masse, Hkt, und sTfR deuteten aber nicht auf Eisenmangel hin. Die BS unterscheiden sich von ST-Bog nur bei der Konzentration des sTfR (Anova $p < 0,01$), jedoch weichen die Werte nicht von den Referenzwerten für Gesunde ab.

Für die anderen Indikatoren des Eisenstoffwechsels und der Erythropoese besteht zwischen den BS und den anderen Gruppen kein wesentlicher Unterschied (Tab 3.10).

Tabelle 3.10. Indikatoren des Eisenstoffwechsels und der Erythropoese bei Bergsteigerinnen und Frauen ähnlicher Leistungsfähigkeit aus Bogotá und Berlin.

	n	EPO U·l ⁻¹	eASAT U·gHb ⁻¹	Ferritin µg·l ⁻¹	sTfR ng·ml ⁻¹
Ref.-Werte		3.3 – 16.6	1.5 – 4.0	6.9 – 282.5	0.75 – 2.44
BS	6	10.5 ± 1.5	2.5 ± 0.1	24.0 ± 2.6	1.2 ± 0.1
ST-Bog	22	11.8 ± 0.9	2.5 ± 0.1	22.7 ± 2.5	1.7 ± 0.1 ^d
UT-Ber	13	7.5 ± 1.3	2.8 ± 0.1	32.3 ± 5.3	1.5 ± 0.1

Mittelwerte und Standardfehler von Erythropoetin-Aktivität (**EPO**), erythrocytärer Aspartat Aminotransferase-Aktivität (**eASAT**), löslichem Transferrin-Rezeptor (**sTfR**) und Ferritin-Konzentration bei Bergsteigerinnen (**BS**), semitrainierten Frauen aus Bogotá (**ST-Bog**) und untrainierten aus Berlin (**UT-Ber**). Symbole für die Statistik wie in Tabelle 3.8

3.3. Untersuchungen an postmenopausalen Frauen

3.3.1. Anthropometrie und maximale aerobe Leistungsfähigkeit (VO_2max)

Da nicht alle postmenopausalen trainierten Frauen für die gleiche Disziplin spezialisiert waren, wurden die Untergruppen auf statistische Unterschiede für die gemessenen Größen überprüft. Die eine Untergruppe bildete auf Langstrecke spezialisierte und die andere auf Kurzstrecke und Wurfdisziplinen spezialisierte Frauen. Zwischen den Untergruppen wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt und deswegen eine einzige Gruppe gebildet, die Vergleichsergebnisse werden nicht gezeigt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3.11 zusammengefasst. Wegen fehlender statistischer Unterschiede zwischen den postmenopausalen Untergruppen konnte ihr Trainingszustand auch nicht in Ausdauer- oder Semitrainierte eingestuft werden und diese werden nur als Trainierte (T) bezeichnet.

Tabelle 3.11 Anthropometrie von jungen und postmenopausalen Frauen aus Bogotá

	n	Alter Jahr	Gewicht kg	Grösse cm	BMI $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	Fett %	VO_2max $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	$\text{VO}_2\text{max}_{\text{fTM}}$ $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$
UTJ	19	19.9 ± 0.8	58.0 ± 1.5	160 ± 0.1	22.6 ± 0.5	22.2 ± 0.8	27.1 ± 1.0	35.2 ± 0.9
ATJ	16	24.6 ± 1.6	54.2 ± 1.7	159 ± 0.1	21.4 ± 0.5	16.1 ± 1.6	44.1 ± 0.9	53.4 ± 1.6
UTPM	12	62.0 ± 1.7 ^{cc}	64.9 ± 2.7 ^c	154 ± 0.1	27.1 ± 0.9 ^{cc}	30.9 ± 1.6 ^{cc}	19.2 ± 1.1 ^{cc}	27.9 ± 1.6 ^c
TPM	9	59.1 ± 1.4 ^{cc}	61.0 ± 2.3 ^c	153 ± 0.1	26.2 ± 0.8 ^{cc}	27.5 ± 1.4 ^{cc}	27.6 ± 1.0 ^{bb,cc}	38.2 ± 1.9 ^{bbcc}
Anova			cc	cc	cc	cc	cc	cc

Mittelwerte und Standardfehler von Messungen an untrainierten (**UTJ**), Ausdauertrainierten (**ATJ**) jungen sowie an untrainierten (**UTPM**) und trainierten postmenopausalen (**TPM**) Frauen aus Bogotá. ($\text{VO}_2\text{max}_{\text{fTM}}$) Maximale Sauerstoffaufnahme bezogen auf fettfreies Körpergewicht. Anova (letzte Zeile) und t-Test mit Bonferroni-Korrektur bzw. Tamhane-Test für Alterseffekt mit $p < 0.05$ (c) und mit $p < 0.01$ oder kleiner (cc). Trainingseffekt unter postmenopausalen Frauen mit $p < 0.01$ oder kleiner (bb). Trainingseffekt bei jungen Frauen siehe in Kapitel 3.1.

Unabhängig vom Trainingszustand ergeben sich in der Gesamtvarianzanalyse hoch signifikante Unterschiede für das Körpergewicht zwischen jungen und alten Frauen ($p < 0.001$, Tab 3.11). Der Fettanteil und der BMI waren bei älteren Frauen wesentlich höher als bei der Kontrollgruppe der jungen Frauen, dies ist auch beim Vergleich unter trainierten Frauen zu beobachten. TPM-Frauen haben niedrigere Werte für Körpergewicht, Fettanteil und BMI als ihre untrainierten Altersgenossinnen, der Unterschied ist aber nicht signifikant. Die VO_2max ist signifikant höher bei trainierten Probandinnen (t-Test $p < 0.001$) und deutlich erniedrigt bei älteren Frauen (t-Test, $p < 0.001$, Tab 3.11). Die Berechnung der VO_2max bezogen auf fettfreies Körpergewicht verringert die Unterschiede zwischen den Gruppen um etwa 10%, signifikante Differenzen bleiben erhalten.

3.3.2. Arterielle Sättigung und hämatologische Messungen

Die SaO₂ im Blut postmenopausaler Frauen war 4.4% (p<0.001) geringer als bei jungen Frauen. Der Hkt von älteren Frauen war signifikant höher (Anova p<0.05) als der von jungen Frauen. Das Training dagegen zeigt keine Wirkung auf die SaO₂. Die [Hb] und MCHC zeigten sich von Alter und Training unabhängig (Tab. 3.12).

Tabelle 3.12 Hämatologische Messungen und Hb-Masse bei jungen und postmenopausalen Frauen aus Bogotá.

	n	SaO ₂ %	[Hb] g·dl ⁻¹	Hkt %	MCHC g·dl ⁻¹	Hb-Masse g·kg ⁻¹	Hb-Masse (ff) g·kg ⁻¹
UTJ	19	93.3 ± 0.2	14.3 ± 0.2	42.9 ± 0.6	33.3 ± 0.3	9.1 ± 0.2	11.7 ± 0.3
ATJ	16	93.8 ± 0.1	13.8 ± 0.2	42.8 ± 0.6	32.3 ± 0.3	11.6 ± 0.3	14.2 ± 0.5
UTPM	12	89.3 ± 0.5 ^{cc}	14.3 ± 0.3	44.5 ± 0.8	32.1 ± 0.4	8.7 ± 0.4	12.8 ± 0.4 ^c
TPM	9	89.1 ± 0.4 ^{cc}	14.1 ± 0.2	44.0 ± 0.7	32.0 ± 0.3	10.4 ± 0.4 ^{bccc}	14.6 ± 0.4 ^b
Anova		cc		c			c

Mittelwerte und Standardfehler von Messungen an untrainierten (**UTJ**) und ausdauertrainierten (**ATJ**) jungen sowie an untrainierten (**UTPM**) und trainierten (**TPM**) postmenopausalen Frauen aus Bogotá. **ff**: Hb-Masse bezogen auf fettfreies Körpergewicht. Trainingseffekt unter jungen Frauen siehe Kapitel 3.1.4. Symbole für die Statistik wie in Tabelle 3.11. Trainingseffekt bei jungen Frauen siehe in Kapitel 3.1.

3.3.3. Die Hb-Masse

Die Hb-Masse von UTPM ist etwa gleich groß wie bei UTJ. Mit dem Training nimmt die Hb-Masse sowohl bei jungen als auch bei postmenopausalen Frauen zu, der Anstieg ist bei J-Frauen aber deutlich größer (+2.5 gHb·kg⁻¹) als bei PM-Frauen (+1.7 gHb·kg⁻¹). Dies gilt auch, wenn man die prozentuale Änderungen von Hb-Masse und VO₂max in Betracht zieht. Da PM-Frauen einen höheren Fettanteil als junge Frauen besitzen, ergaben sich bei Berechnung der Hb-Masse je Kilogramm fettfreies Körpergewicht wesentlich höhere Werte bei den PM-Frauen (Anova p<0.05). Der Unterschied in der Hb-Masse zwischen den untrainierten alten und jungen Frauen wird dann sogar signifikant (+1.1 g·kg⁻¹), der Unterschied bei den Trainierten verschwindet.

3.3.4. Blutvolumina

Unabhängig vom Alter haben UT-Frauen ähnliche Blutvolumina, aber mit dem Training bilden junge Frauen wesentlich mehr EV und PV als die postmenopausalen (t-Test p<0.001, Abb. 3.16A). Bei Berechnung der Werte für fettfreie Körpermasse verschwindet der Alterseffekt zwischen den trainierten Probandinnen und zwischen den untrainierten wird dieser für das EV sogar signifikant wie für die Hb-Masse (Abb. 3.17 B). Der Trainingseffekt bei PM-Frauen wird für EV und PV um 4.0% bzw. 3.0% kleiner, bleibt aber signifikant.

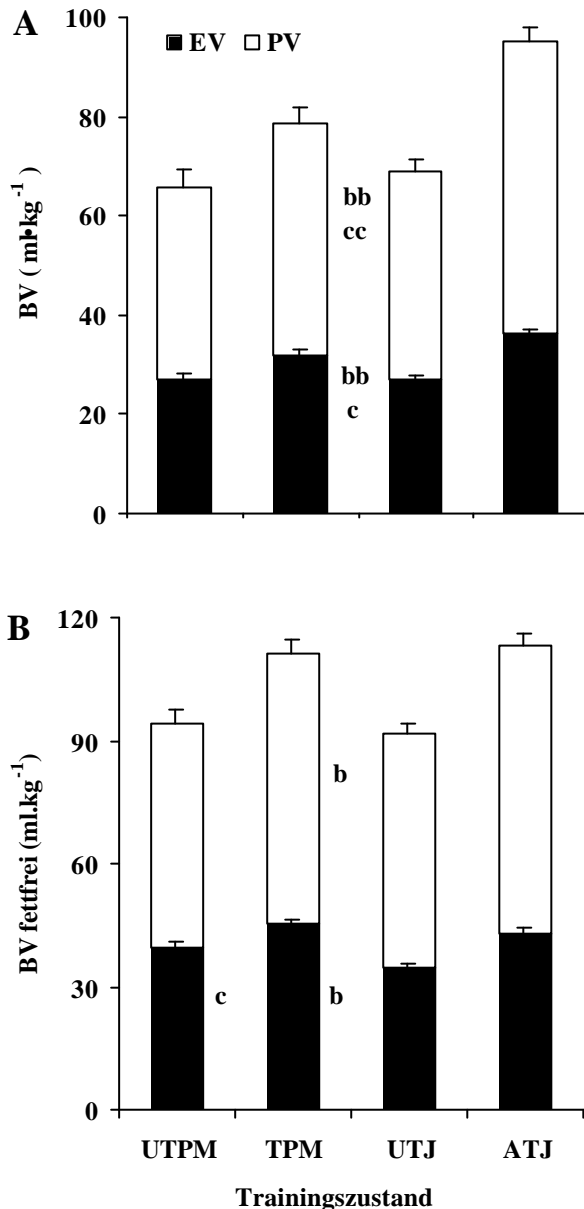


Abb. 317. Mittelwerte und Standardfehler von Erythrozyten- (EV, schwarze Balken) und Plasma-Volumen (PV, weiße Balken) (Blutvolumen BV schwarze + weiße Balken) bei untrainierten (UTJ) und ausdauertrainierten (ATJ) jungen sowie bei trainierten (TPM) und untrainierten (UTPM) post-menopausalen Frauen aus Bogotá. Werte bezogen auf Körpergewicht (A) und auf fettfreies Körpergewicht (B). t-Test nach Bonferroni-Korrektur bzw. Tamhane-Test für Trainingseffekt unter Postmeno-pausalen mit $p < 0.05$ (b) mit $p < 0.01$ oder kleiner (bb) und Alterseffekt mit $p < 0.5$ (c) und $p < 0.01$ oder kleiner (cc). Trainingseffekt bei jungen Frauen siehe in Kapitel 3.1.

3.2.5. Zusammenhang zwischen Hb-Masse oder Blutvolumen und $VO_2\max$.

Sowohl bei jungen als auch bei postmenopausalen Frauen ist die Leistungsfähigkeit mit der Hb-Masse und dem Blutvolumen (Abb. 3.18A und 3.19A) gut korreliert. Die Regressionsgeraden älterer Frauen verlaufen etwas flacher als die junger Frauen. Bei gleichem Hb und BV ist die Leistungsfähigkeit junger Frauen größer. Da junge trainierte Frauen mehr Hb-Masse und BV bilden, überlappen beide Gruppen vor allem im niedrigen Wertebereich. Bei jungen Frauen benötigt die Verbesserung der $VO_2\max$ um $1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ einen Anstieg der Hb-Masse und des BV um $0.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ bzw. $1.85 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$. Bei den älteren Frauen erfordert der gleiche Leistungszuwachs $0.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ bzw. $2.4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$. Um festzustellen, wie groß der Einfluss des Fettanteils in höheren Alter ist, wurden die Kenngrößen bezogen auf fettfreies Körpergewicht aufgetragen.

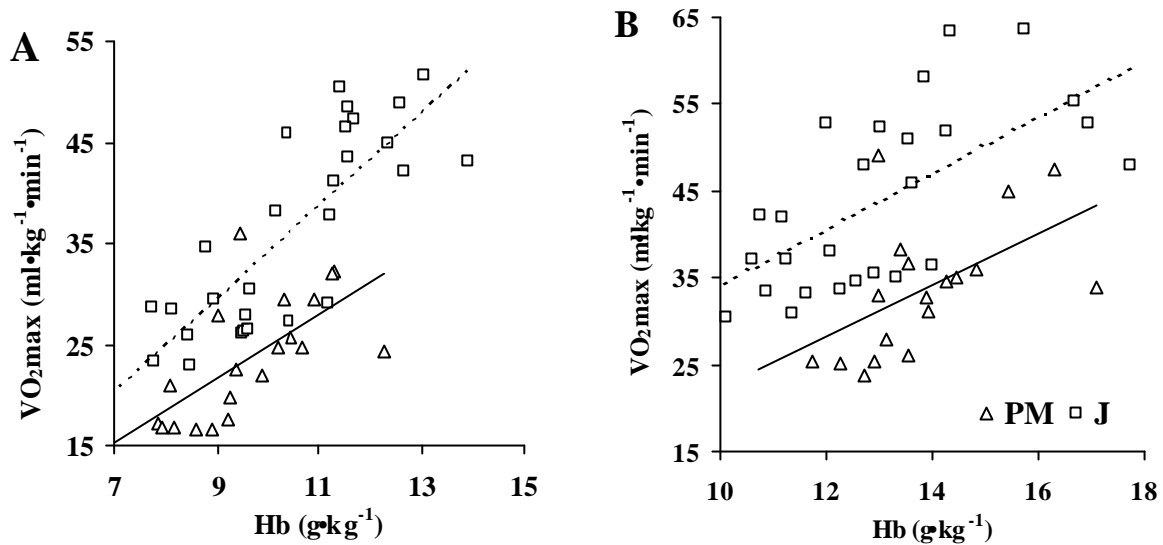


Abb. 3.18 Zusammenhang zwischen Hb-Masse und $VO_2\max$. **(A)** Regressionsgeraden mit Körpergewicht berechnet bei jungen (**J**) ($VO_2\max=4.6Hb-11.8$, $r=0.81$, $p<0.001$, gestrichelte Linien) und postmenopausalen Frauen (**PM**) ($VO_2\max= 3.17Hb-6.98$, $r=0.67$, $p<0.01$, durchgezogene Linien). **(B)** Regressionsgeraden berechnet mit fettfreiem Körpergewicht. Junge Frauen $VO_2\max=3.2 (Hb)+1.4$, $r=0.65$, $p<0.001$, postmenopausale Frauen $VO_2\max = 3.0 (Hb) - 7.8$, $r=0.53$, $p<0.02$.

Die Regressionsgeraden junger und postmenopausaler Frauen verlaufen nach dieser Korrektur annähernd parallel und erfahren eine Verschiebung nach rechts und nach oben, so dass die Überlappung meist in mittleren Leistungsbereich erfolgt. PM-Frauen erreichen eine vergleichbare Hb-Masse (Abb. 3.18B und 3. 19B).

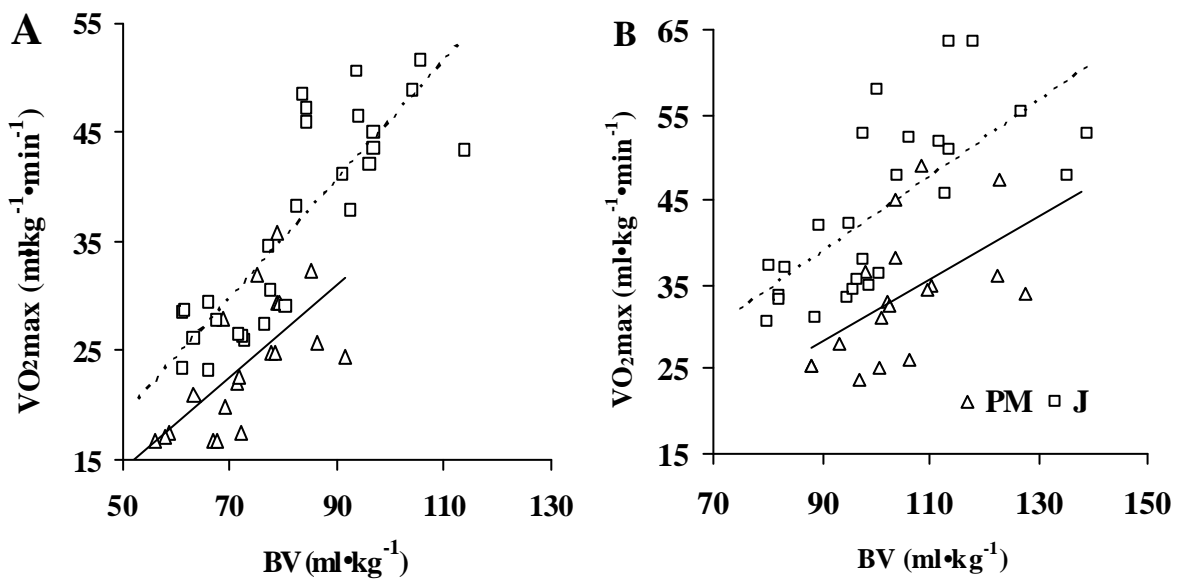


Abb. 3.18. Zusammenhang zwischen Blutvolumen und $VO_2\max$. Regressionsgeraden mit Körpergewicht berechnet **(A)** bei jungen (**J**) ($VO_2\max=0.54.BV-8.2$, $r=0.84$, $p<0.001$, gestrichelte Linien) und bei postmenopausalen Frauen (**PM**) ($VO_2\max= 0.42BV-6.8$, $r=0.737$, $p<0.001$ durchgezogene Linien). Regressionsgeraden berechnet mit fettfreiem Körpergewicht **(B)**. Junge Frauen $VO_2\max=0.44(BV)-1.9$, $r=0.70$, $p<0.001$, postmenopausale Frauen, $VO_2\max=0.42(BV)-6.9$, $r=0.67$, $p<0.02$.

3.2.6. Indikatoren der Erythropoese und des Eisenstoffwechsels

Die Ergebnisse für die Messung der Erythropoeseindikatoren und der Indikatoren des Eisenstoffwechsels bei jungen und postmenopausalen Frauen sind in der Tabelle 3.13 gegenübergestellt.

Tabelle 3.13 Indikatoren des Eisenstoffwechsel und der Erythropoese bei postmenopausalen und jungen Frauen aus Bogotá.

		EPO U·l ⁻¹	Retic. ‰	eASAT U·gHb ⁻¹	Ferritin µg·l ⁻¹	sTfR ng·ml ⁻¹
Ref.-Werte		3.3 – 16.6	5.0 – 15.0	1.5 – 4.0	6.9 – 282.5*	0.75 – 2.44
	N					
UTJ	19	9.1 ± 0.8	8.7 ± 0.9	2.5 ± 0.1	40.6 ± 4.7	1.7 ± 0.1
ATJ	16	10.5 ± 1.1	13.5 ± 1.8	2.8 ± 0.2	27.1 ± 5.6	1.9 ± 0.1
UTPM	9	12.0 ± 1.5	7.8 ± 2.3	2.8 ± 0.2	95.3 ± 10.8 ^c	1.8 ± 0.1
TPM	12	10.1 ± 1.2	8.1 ± 1.9	2.7 ± 0.2	67.2 ± 9.2 ^{cc}	1.9 ± 0.1
					cc	

Mittelwerte und Standardfehler von Erythropoetin-Aktivität (**EPO**), Reticulocytenzahl (**Retic.**), erythrocytäre Aspartat Aminotransferase-Aktivität (**eASAT**) und löslichem Transferrin-Rezeptor (**sTfR**) bei untrainierten (**UTJ**) und ausdauertrainierten (**ATJ**) jungen sowie bei trainierten (**TPM**) und untrainierten postmenopausalen (**UTPM**) Frauen aus Bogotá. *Referenzbereich für postmenopausale Frauen beträgt 14–231 µg·l⁻¹. Symbole für Statistik wie in Tabelle 3.11.

Zwei Indikatoren der Erythropoese, nämlich EPO- und eASAT-Aktivität zeigen weder Alters- noch Trainingsunterschiede. Bezüglich der Reticulocytenzahl besteht ein grenzwertiger Altersunterschied (Tamhane-Test, $p < 0.07$) zwischen trainierten Frauen. Unter den Eisenindikatoren ist nur die Ferritinkonzentration bei postmenopausalen Frauen signifikant erhöht (Anova, $p < 0.01$) mit einer Tendenz zu niedrigeren Werten bei TPM.