

O. Volk, G. Neumann

## Verhalten ausgewählter Aminosäuren während eines Dreifachlangtriathlons.

### *Behaviour of selected amino acids during a triple iron ultratriathlon*

<sup>1</sup> Medizinische Klinik I, Klinikum Krefeld<sup>2</sup> Institut für angewandte Trainingswissenschaft e.V., Leipzig

#### Zusammenfassung

Bei 9 Triathleten wurden vor, während und nach einem Dreifachlangtriathlon (11,4 km Schwimmen, 540 km Radfahren, 126,6 km Laufen) Veränderungen der Aminosäurenkonzentration und weiterer Stoffwechselfparameter bestimmt. Die durchschnittliche Wettkampfzeit betrug 48 h. Die Belastung führte zu einer signifikanten Hämatokritabnahme von  $48 \pm 4 \%$  auf  $45 \pm 3 \%$  ( $p < 0,05$ ). Die Gesamtkonzentration der Plasmaamino säuren (AA) nahm von  $2590 \pm 294 \mu\text{mol/l}$  auf  $2186 \pm 409 \mu\text{mol/l}$  ab. Die verzweigtkettigen AA (Val, Leu Ile) verringerten sich von  $449 \pm 103 \mu\text{mol/l}$  auf  $355 \pm 101 \mu\text{mol/l}$  signifikant. Hingegen nahmen die aromatischen AA (Trp, Tyr, Phe) von  $173 \pm 34 \mu\text{mol/l}$  auf  $206 \pm 38 \mu\text{mol/l}$  zu. Der Quotient aus verzweigtkettigen und aromatischen AA verminderte sich von  $2,6 \pm 0,5$  auf  $1,7 \pm 0,4$ . Pro, Orn, Gly, Ile, Val und Ala nahmen um 25-50 % ab, während Tau, Phe und Tyr um 20-30 % anstiegen. Unverändert verhielten sich Gln, Cys und Arg. Trotz reichlicher und ständiger Nahrungsaufnahme während der Belastung kam es zu einer Abnahme der Konzentration glukogener AA. Die durchschnittlich 48 h dauernde und bei relativ niedrigen Fortbewegungsgeschwindigkeiten durchgeführte Belastung führte zu einem starken Proteinkatabolismus (Harnstoff-N von  $7,0 \pm 1,4 \text{ mmol/l}$  auf  $9,2 \pm 3,4 \text{ mmol/l}$ ,  $p < 0,05$ ).

**Schlüsselworte:** Ultratriathlon, Plasmaamino säuren, Katabolismus, zentrale Ermüdung

#### Einleitung

1978 starteten 15 Männer bei dem ersten Ironman-Triathlon auf Hawaii, einem Ausdauerdreikampf über 3,8 km Schwimmen, 180 km Radfahren und 42,2 km Laufen. Im Laufe der nächsten Jahre wurden Langtriathlons mit der mehrfachen Wiederholung dieser Distanz durchgeführt. Der doppelte Langtriathlon wurde 1985 in Huntsville (USA) und der Dreifache 1988 in Fontanil (Frankreich) erstmalig durchgeführt. Weitere Steigerungen waren der fünffache Langtriathlon (1991 in Den Haag), der zehnfache (1992), der fünfzehnfache (1995) sowie der zwanzigfache Langtriathlon (1998) in Monterrey/Mexiko. Der Zwanzigfache bedeutet die Bewältigung von 76 km Schwimmen, 3600 km Radfahren und 844 km Laufen hintereinander (14). Die Siegerzeit bei den Männern betrug 18 d 5:21:40 h und bei den Frauen 26 d 19:01:49 h. Wissenschaftliche Untersuchungen zu den Auswirkungen

#### Summary

We analyzed plasma amino acids and metabolic parameters in 9 triathletes before, during and after an ultratriathlon (11.4 km swimming, 540 km cycling, 126.6 km running). The average competition time was 48 h. The exercise led to a significant decrease in hematocrit from  $48 \pm 4 \%$  to  $45 \pm 3 \%$ . The concentration of the summed plasma amino acids (AA) decreased from  $2590 \pm 294 \mu\text{mol/L}$  to  $2186 \pm 409 \mu\text{mol/L}$ . The branched-chain amino acids (BCAA) decreased significantly from  $449 \pm 103 \mu\text{mol/L}$  to  $355 \pm 101 \mu\text{mol/L}$ . The aromatic AA (AAA) increased from  $173 \pm 34 \mu\text{mol/L}$  to  $206 \pm 38 \mu\text{mol/L}$ . The BCAA/AAA ratio decreased from  $2.6 \pm 0.5$  to  $1.7 \pm 0.4$ . Pro, Orn, Gly, Ile, Val and Ala increased by 25-50 %. Tau, Phe and Tyr decreased by 20-30 %. Gln, Cys and Arg remained unchanged. In spite of continuous food intake, the exercise led to a significant decrease of glucogenic AA. The 48 h lasting triathlon resulted in a protein-catabolic state (serum urea increased from  $7.0 \pm 1.4 \text{ mmol/L}$  to  $9.2 \pm 3.4 \text{ mmol/L}$ ,  $p < 0.05$ ) in spite of a slow moving speed.

**Key words:** ultratriathlon – plasma amino acids – catabolism – central fatigue.

extremer Ausdauerdistanzen auf die Aminosäurenkonzentrationen sind selten bzw. stehen noch aus. Es fanden sich meist sehr differenzierte Konzentrationsänderungen. Verminderte Plasmakonzentrationen der Gesamtamino säuren (AA) um 15 – 30 % wurden nach Langtriathlons (30), 100 km-Läufen [13] und Skimarathons (43) beschrieben. Die verzweigtkettigen Aminosäuren (BCAA: Valin, Leucin, Isoleucin) zeigten Reduktionen um 18 – 42 % (3, 4, 30, 43) oder unveränderte Plasmakonzentrationen (10), während die aromatischen Aminosäuren (AAA: Tryptophan, Phenylalanin, Tyrosin) um 6 – 11 % anstiegen (3, 4, 30). Die aromatische Aminosäure Tryptophan (Trp) ist Ausgangssubstanz der Biosynthese des Neurotransmitters Serotonin (5-HT). 5-HT ist verantwortlich für die Induktion von Müdigkeit und Schlaf (20, 40). Dem Quotient aus BCAA und AAA (BCAA/AAA) bzw. aus BCAA und freiem Tryptophan (BCAA/fTrp) wird eine zentrale Rolle in der Entstehung von körperlicher Er-

schöpfung unterstellt [38]. BCAA, AAA und Methionin (Met) benutzen das gleiche Transportsystem durch die Blut-Hirn-Schranke. Während Ausdauerbelastungen fand sich ein Abfall des Quotienten BCAA/AAA und BCAA/fTrp (3, 4, 10, 30, 43) mit einem erhöhten transcapillären Flux des fTrp ins Gehirn. Daraus resultiert eine erhöhte cerebrale Konzentration von 5-HT.

Ziel dieser Untersuchung war, die Auswirkungen eines Dreifachlangtriathlons (11,4 km Schwimmen, 540 km Rad und 126,6 km Lauf) mit einer zu erwartenden mittleren Gesamtbelastungsdauer von über 48 Stunden auf das Aminosäuremuster zu messen. Die Auswirkungen einer extremen Dauerleistung dieses Ausmaßes bei einer relativ niedrigen Bewegungsgeschwindigkeit sind nicht bekannt.

## Methodik

### Gegenstand der Untersuchung

Diese Untersuchung wurde im Rahmen eines Langtriathlons durchgeführt, der im Juli 1997 in Lensahn/Ostholstein stattfand. Der Triathlon umfasste 11,4 km Schwimmen in einem Freibad mit 50 m-Schwimmbecken (Wassertemperatur 26°C), 540 km Radfahren auf einem flachen Rundkurs von 9,65 km und 126,6 km Laufen auf einem ebenfalls flachen Rundkurs von 1,319 km (Lufttemperaturen 20°C bis 30°C). Der Start erfolgte am 25.7.1997, 7.00 Uhr, das Zeitlimit betrug 58 h bis 27.7.1997, 17.00 Uhr. Teilnehmer waren 22 erfahrene, mehrjährig ausdauertrainierte Athleten, die täglich durchschnittlich 2 bis 4 Stunden trainierten. Davon beteiligten sich 8 Männer und eine Frau (Alter: 39,4±12,0 Jahre, Gewicht: 72,1±9,1 kg, Größe: 176,2±6,6 cm) an der Studie. Die Ernährung und Flüssigkeitsaufnahme erfolgte ad libitum ohne Protokollierung.

### Labordiagnostik

Insgesamt wurden vier Blutabnahmen durchgeführt:

- nach der Wettkampfbesprechung am Abend vor dem Start (VorSt), 24.Juli 1997, 16.00 bis 18.00 Uhr,
- nach dem Schwimmen (Schw), 25.Juli 1997, 10.00 bis 12.00 Uhr,
- nach dem Radfahren (Rad), 26.Juli 1997, 5.00 bis 22.00 Uhr und
- nach dem Laufen (Lauf), 26.Juli 1997, 19.00 Uhr bis 27.Juli 1997, 16.00 Uhr.

Die Blutentnahmen erfolgten am liegenden Probanden aus einer gestauten Armvene. Das venöse Blut wurde in Monovetten gesammelt, 10 min bei 1000 U/min zentrifugiert und bei +2 - +8°C gelagert. Zusätzlich wurde arterialisierendes Ohrkapillarblut zur Bestimmung des Hämatokrits (Hkt) durch Zentrifugation des Blutes entnommen.

Tabelle 2: Hämatologische und metabolische Daten der Probanden (Mittelwert ± Standardabweichung)

Parameter	VorSt°	Schwimmen°	Rad °	Ziel°
Hkt (%)	48 ± 4	49 ± 3	48 ± 3	45 ± 3 †
Gluk (mmol/l)	5,55 ± 0,82	6,27 ± 1,13	5,69 ± 0,86	6,39 ± 1,19 †
FFA (mmol/l)	0,308 ± 0,101	1,164 ± 0,602 †	1,726 ± 0,672 †	1,231 ± 0,556 †
OH-But (µmol/l)	74 ± 15	176 ± 50 †	642 ± 522 †	384 ± 234 †
Harnstoff (mmol/l)	7,0 ± 1,4	7,9 ± 1,7	10,9 ± 3,3 †	9,2 ± 3,4
Insulin (µU/ml)	13,89 ± 13,24	4,89 ± 1,46 †	5,93 ± 3,55 †	6,27 ± 4,64 †

° Zeitpunkte der Blutabnahmen: VorSt: am Abend vor dem Start, Schwimmen: nach 11,4 km Schwimmen  
Rad: nach zusätzlich 540 km Radfahren, Ziel: nach zusätzlich 126,6 km Laufen  
† p < 0,05 für den Vergleich zum VorSt, ‡ p < 0,01 für den Vergleich zum VorSt

Die Bestimmung der Glukose (Gluk, GOD/POD-Methode), der Triglyceride (Trig, LPL/GK/GPO/POD-Methode) und des Harnstoff-N (Hst, Urease/GLDH-Methode) erfolgte auf dem ILAB 900 (Instrumentation Laboratory), diejenige der β-Hydroxybuttersäure (OH-But) photometrisch auf Hitachi. Die freien Fettsäuren (FFS) wurden nach der ACS/ACOD/POD-Methode auf dem LS500 (Dr. Lange) sowie Insulin (Ins) mittels RIA (Pharmacia) analysiert. Das Aminosäurespektrum wurde mit der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (Aminomat, Biorad) bestimmt. Analysiert wurden folgende Aminosäuren: Glycin (Gly), Alanin (Ala), Valin (Val), Leucin (Leu), Isoleucin (Ile), Serin (Ser), Threonin (Thr), Cystein (Cys), Methionin (Met), Asparagin (Asn), Glutamin (Gln), Arginin (Arg), Histidin (His), Tryptophan (Trp), Phenylalanin (Phe), Tyrosin (Tyr), Prolin (Pro), Hydroxyprolin (OH-Pro), Ornithin (Orn), Citrullin (Cit), Taurin (Tau).

### Statistik

Von den Messwerten wurden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet.

Tabelle 1: Durchschnittliche Wettkampfzeiten nach dem Schwimmen, Radfahren und Laufen, sowie die Gesamtzeit.

Variable	Zeit in Stunden*
Schwimmen	3,87 ± 0,84
Radfahren	23,97 ± 3,70
Laufen	20,07 ± 3,64
Gesamtzeit	47,91 ± 7,57

\* Mittelwert ± Standardabweichung

Unterschiede von p < 0,01 wurden als hochsignifikant bezeichnet.

## Ergebnisse

Alle 9 Probanden beendeten den Wettkampf. Die Endzeiten bewegten sich zwischen 38:39:26 h und 57:12:05 h (Tab. 1). Die mittlere Gesamtzeit betrug 47:55:12 h. Der Hkt (Tab. 2) zeigte im Ziel eine signifikante Abnahme gegenüber dem VorSt (48 ± 4 % auf 45 ± 3 %). Die Gluk (Tab. 2) war stets im Normbereich und stieg gegenüber dem VorSt im Ziel signifikant an, während es zu einem signifikanten Anstieg der FFS und der OH-But am Belastungsende jeder Sportart kam (Tab. 2). Die FFS stiegen vom VorSt bis nach dem Radfahren kontinuierlich an, um dann nach dem Laufen im Ziel wieder etwas abzufallen. Ähnlich verhielt sich die OH-But und Hst (Tab. 2). Ins (Tab. 2) fiel von 13,89 ± 13,24 µU/ml auf 4,89 ±

Tabelle 3: Darstellung der Summe von 21 Aminosäuren (AA), der verzweigtkettigen Aminosäuren (BCAA) und der aromatischen Aminosäuren (AAA, in  $\mu\text{mol/l}$ ) sowie Darstellung der Quotienten BCAA/Gesamt-Trp und BCAA/AAA\* (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung).

Parameter	VorSt	Schwimmen <sup>o</sup>	Rad <sup>o</sup>	Ziel <sup>o</sup>	Änderung in % <sup>a</sup>
AA ( $\mu\text{mol/l}$ )	2590 $\pm$ 294	2488 $\pm$ 223	2003 $\pm$ 233 †	2186 $\pm$ 409	- 16 %
BCAA ( $\mu\text{mol/l}$ )	449 $\pm$ 103	463 $\pm$ 146	321 $\pm$ 97 †	355 $\pm$ 101 †	- 21 %
AAA ( $\mu\text{mol/l}$ )	173 $\pm$ 34	178 $\pm$ 29	166 $\pm$ 30	206 $\pm$ 38	+ 16 %
BCAA/AAA	2,6 $\pm$ 0,5	2,7 $\pm$ 1,0	2,0 $\pm$ 0,6 †	1,7 $\pm$ 0,4 †	- 34 %
BCAA/Trp	9,2 $\pm$ 2,0	14,5 $\pm$ 10,1	12,0 $\pm$ 5,6	7,9 $\pm$ 2,0 †	- 14 %

<sup>o</sup> Zeitpunkte der Blutabnahmen: s. Tab. 2

†  $p < 0,05$  für den Vergleich zum VorSt, †  $p < 0,01$  für den Vergleich zum VorSt

<sup>a</sup> Prozentuale Änderung von VorSt bis Ziel

1,46  $\mu\text{U/ml}$  nach dem Schwimmen, 5,93  $\pm$  3,55  $\mu\text{U/ml}$  nach dem Rad und auf 6,27  $\mu\text{U/ml}$  nach dem Lauf signifikant bzw. hochsignifikant ab.

Die Summe der 21 analysierten Aminosäuren (Tab. 3) fiel hochsignifikant vom VorSt bis nach dem Rad ab, um bis ins Ziel wieder geringfügig anzusteigen, jedoch noch 16 % unterhalb des Ausgangswertes zu liegen. Bei Betrachtung der einzelnen Aminosäuren fiel ein differenziertes Verhalten auf.

Tabelle 4: Darstellung der Aminosäuren mit abfallenden Serumkonzentrationen (in  $\mu\text{mol/l}$ ). Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung.

Parameter	Normwert	VorSt <sup>o</sup>	Schwimmen <sup>o</sup>	Rad <sup>o</sup>	Ziel <sup>o</sup>	Änderung in % <sup>a</sup>
Leu	76 – 176	126 $\pm$ 36	132 $\pm$ 37	100 $\pm$ 31	117 $\pm$ 30	- 7 %
Trp	25 – 125	50 $\pm$ 12	37 $\pm$ 11 †	29 $\pm$ 7 †	47 $\pm$ 15	- 7 %
Thr	75 – 210	106 $\pm$ 28	101 $\pm$ 20	80 $\pm$ 15 †	93 $\pm$ 20	- 12 %
Cit	15 – 55	30 $\pm$ 7	32 $\pm$ 3	21 $\pm$ 5 †	25 $\pm$ 9	- 17 %
Ser	75 – 170	96 $\pm$ 14	83 $\pm$ 12	74 $\pm$ 15 †	75 $\pm$ 16 †	- 22 %
Ala	245 – 500	383 $\pm$ 45	406 $\pm$ 62	245 $\pm$ 55 †	287 $\pm$ 117	- 25 %
Val	145 – 315	249 $\pm$ 45	255 $\pm$ 79	166 $\pm$ 46 †	184 $\pm$ 56 †	- 26 %
Ile	40 – 100	73 $\pm$ 24	76 $\pm$ 31	54 $\pm$ 22	54 $\pm$ 18 †	- 26 %
Gly	120 – 560	235 $\pm$ 41	190 $\pm$ 40	183 $\pm$ 66	169 $\pm$ 25 †	- 28 %
Orn	30 – 400	84 $\pm$ 19	61 $\pm$ 14 †	41 $\pm$ 11 †	47 $\pm$ 16 †	- 44 %
Pro	105 – 340	249 $\pm$ 72	196 $\pm$ 52 †	141 $\pm$ 35 †	125 $\pm$ 48 †	- 50 %

<sup>o</sup> Zeitpunkte der Blutabnahmen: s. Tab. 2

†  $p < 0,05$  für den Vergleich zum VorSt, †  $p < 0,01$  für den Vergleich zum VorSt,

<sup>a</sup> Prozentuale Änderung von VorSt bis Ziel

11 der 21 Aminosäuren zeigten einen zum Teil signifikanten Abfall um bis zu 50 % des Ausgangswertes (Tab. 4). Geringere Reduktionen um 7 – 17 % zeigten Cit, Thr und Trp. 3 Aminosäuren (Tau, Phe, Tyr) stiegen zwischen 20 % und 31 % an (Tab. 5). Unveränderte Konzentrationen zeigten Cys, Arg, Gln und His (Tab. 6). Die verzweigtkettigen Aminosäuren (BCAA: Val, Leu, Ile) fielen während des Triathlons signifikant von 449  $\pm$  103  $\mu\text{mol/l}$  auf 321  $\pm$  97  $\mu\text{mol/l}$  nach dem Rad und auf 355  $\pm$  101  $\mu\text{mol/l}$  im Ziel (Tab. 3). Im Gegensatz dazu stand der Anstieg der aromatischen Aminosäuren (AAA: Trp, Phe, Tyr), die vom VorSt bis ins Ziel um 16 % zunahm. Der Quotient BCAA/AAA fiel nach dem Rad und im Ziel. BCAA/Trp sank signifikant von 9,2  $\pm$  2,0 auf 7,9  $\pm$  2,0 im Ziel.

## Diskussion

Der Dreifachlangtriathlon ist ein extremer Ausdauerwettbewerb mit weltweit vier Austragungsorten (St.Pölten/Öster-

reich, Fontanil/Frankreich, Lensahn/Deutschland, Colonial-Beach/USA) und rund 15 – 40 Teilnehmern (14). Die bisherige Weltbestzeit nach 11,4 km Schwimmen, 540 km Radfahren und 126,6 km Laufen liegt bei 32:55:50 h (14). Die hier untersuchten Athleten kamen mit einer mittleren Zeit von 47:55:12 h ins Ziel. Triathleten mit Endzeiten unter

48 Stunden hatten die Belastung weitgehend nonstop und ohne Schlaf ausgeführt. Athleten mit längerer Gesamtbelastung leisteten sich zwischendurch Kurzschlafpausen von maximal 2 Stunden Dauer.

Während des Wettkampfs war der Blutzuckerspiegel unverändert im Normbereich. Die Erfahrung und die mehrjährige Beobachtung der Athleten bestätigen, dass sie eine Belastung dieser Zeitdauer nur durchstehen, wenn sie pro

Belastungsstunde eine Nahrung, bestehend aus Kohlenhydraten, Fettsäuren und Proteinen aufnehmen, wobei die Kohlenhydratmenge pro Stunde etwa 40 – 60 g betragen muss, was der Resorptionsfähigkeit des Magen-Darm-Trakts entspricht (33). Die aufgenommenen Kohlenhydrate, das stark supprimierte Ins sowie eine möglicherweise angeregte Glukoneogenese bewahren den Sportler vor einer Hypoglykämie. Übereinstimmend beschrieben zahlreiche Autoren, dass bei mehr-

stündigen Ausdauerbelastungen keine hypoglykämischen Reaktionen zu erwarten sind, wenn Kohlenhydrate aufgenommen werden (2, 26, 27, 31, 39, 44). Das Belastungstempo wird so gewählt, dass es in aerober Stoffwechsellage zu einem hohen Fettsäureumsatz kommt und der Blutzuckerspiegel nicht abfällt (35).

Bei Veranschlagung eines Energieumsatzes von 500–600 kcal/h (11) werden bei durchgehender Belastung in 24 Stunden 12.000 kcal verbraucht. Für den Gesamtwettkampf beträgt der spekulierte Energiebedarf demnach etwa 25.000 – 30.000 kcal. Die Sicherung dieses außergewöhnlichen energetischen Bedarfs kann durch ein hohes Angebot abgebauter Fettsäuren gewährleistet werden, kenntlich am hochsignifikanten Anstieg der FFS und dem Abfall der Trig (25, 26, 29, 32). Voraussetzung für einen ungestörten Abbau der FFS via  $\beta$ -Oxidation ist wiederum die Abnahme des Ins und die dadurch begünstigte die Lipolyse (2). Dennoch befinden sich die Triathleten in einer angespannten Stoffwechsellage, da die große Menge der anflutenden FFS in der Muskulatur und

der Leber offensichtlich nur unvollständig oxidiert werden können. Diese Stoffwechselsituation ist am extremen Anstieg der Ketonkörper (OH-But) zu erkennen. Solche hohen Ketonkörperanstiege sind im Sport kaum gemessen worden (34).

Die ausgeprägte eiweißkatabole Stoffwechsellage kommt im Anstieg des Hst zum Ausdruck. Unmittelbar nach Ausdauerbelastungen und auch einige Tage danach findet man einen Anstieg des Serumharnstoffs (13, 21, 25, 43). Neben einer verminderten Elimination des Hst über die Nieren (21,

lastung sowie anderen Faktoren, wie Glykogenspeicher und Energieaufnahme, können Aminosäuren bis zu 10 % der benötigten Energie liefern (7).

Die BCAA sowie Ala, Gly, Orn und Pro fielen am deutlichsten ab. Sowohl bei Marathonläufern als auch bei Ultramarathonläufern konnten erniedrigte BCAA-Konzentrationen festgestellt werden. Neben einer gestiegenen Transaminierung im Muskel werden die Carbongerüste für gluconeogenetische Prozesse verwendet (3, 4, 8, 13, 30, 38, 48). Die BCAA sollen angeblich eine Rolle bei der zentralen

Ermüdung von Athleten spielen (20). Langzeitausdauerbelastungen führen neben einer Abnahme der BCAA zum Anstieg der AAA Phe, Tyr und freies Trp (10, 13, 23, 30). Entsprechend konnte ein verminderter Quotient BCAA/AAA und BCAA/Trp festgestellt werden (10, 30, 38). Diese Stoffwechselkonstellation soll zu einem Anstieg der Transportrate der AAA durch die Blut-Hirnschranke und zu einem An-

Tabelle 5: Darstellung der Aminosäuren mit ansteigenden Serumkonzentrationen (in  $\mu\text{mol/l}$ ). Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung.

Parameter	Normwert	VorSt <sup>°</sup>	Schwimmen <sup>°</sup>	Rad <sup>°</sup>	Ziel <sup>°</sup>	Änderung in % <sup>a</sup>
Asn	35 – 45	32 $\pm$ 8	24 $\pm$ 5	30 $\pm$ 9	34 $\pm$ 14	+ 7 %
OH-Pro	0 – Spuren	10 $\pm$ 8	13 $\pm$ 8	15 $\pm$ 12	11 $\pm$ 6	+ 8 %
Met	5 – 40	25 $\pm$ 8	29 $\pm$ 6	29 $\pm$ 11	28 $\pm$ 9	+ 11 %
Tyr	20 – 90	63 $\pm$ 14	76 $\pm$ 11 †	66 $\pm$ 166	79 $\pm$ 17	+ 20 %
Phe	35 – 90	60 $\pm$ 13	65 $\pm$ 13	71 $\pm$ 12	80 $\pm$ 13 †	+ 25 %
Tau	25 – 170	39 $\pm$ 7	62 $\pm$ 24 †	48 $\pm$ 7 †	57 $\pm$ 30	+ 31 %

<sup>°</sup> Zeitpunkte der Blutabnahmen: s. Tab. 2

†  $p < 0,05$  für den Vergleich zum VorSt, ‡  $p < 0,01$  für den Vergleich zum VorSt

<sup>a</sup> Prozentuale Änderung von VorSt bis Ziel

25), kommt es zu einem erhöhten Ammoniak-Anfall aus dem Aminosäurenkatabolismus (7, 23) und dem Nucleotidabbau (19) sowie zu einer gesteigerten Ureogenese.

Im Gefüge des stark auf Katabolismus eingestellten Stoffwechsels kam es zu einem differenten Verhalten der Aminosäurenkonzentration nach den einzelnen Teilsportarten mit angesteigerten, unveränderten und reduzierten Konzentrationen der einzelnen Aminosäuren. Die Summe der Plasmaamino-säuren zeigte nach dem Rad einen Abfall um -23 % bzw. bis ins Ziel um -16 %. Verminderte Plasmaamino-säuren wurde nach prolongierter körperlicher Belastung von verschiedenen Autoren nachgewiesen (13, 24, 30, 43). Dabei fallen bei den Autoren unterschiedliche Konzentrationsän-

stieg der Syntheserate des 5-Hydroxytryptamins (5-HT) führen. Die erhöhte Konzentration von 5-HT in bestimmten Hirnregionen fördert die physische und/oder mentale Ermüdung der Athleten bei Langzeitbelastungen (20, 40). Ob die postulierte Ermüdungshypothese bei den hier untersuchten Sportlern zutrifft oder ob gar vorliegende Untersuchung diese These widerlegt, muss offen bleiben, zumal ein Teil der im Rennen führenden Athleten ohne Belastungspause und ohne Schlaf den Wettkampf bestritten. Nach Zieldurchlauf gerieten allerdings die meisten Athleten auf der Massagebank in einen einstündigen Tiefschlaf.

Das Gesamt-Trp nahm nach dem Schw und Rad signifikant ab, erreichte aber am Belastungsende fast wieder den Ausgangswert (-7 %). Wir haben nur das Gesamt-Trp bestimmt, weil das nicht an Albumin gebundene freie Trp eine relativ konstante Größe ist. In Ruhe sind 10 % und bei Belastung 30 % des Gesamt-Trp als freies Trp nachweisbar. Ursache für diesen relativen Anstieg ist die Konkurrenz der Albuminbindungsstellen zwischen Trp und den belastungsabhängig ansteigenden freien Fettsäuren (12). Die Bindung des Trp an Albumin ist von geringer Bedeutung für die Aufnahme in das Gehirn (18), zumal sich Trp bei der Kapillarpassage des Blutes zeitweilig vom Albumin trennt (42).

Pro zeigte eine hochsignifikante Abnahme um bis zu 50 % bis ins Ziel. Die Abnahme des Pro kennzeichnet einen metabolischen Shift zum Glutamat. Durch Fixierung von Ammoniak an Glutamat entsteht Glutamin. Glutamin dient da-

Tabelle 6: Darstellung der Aminosäuren mit unveränderten Serumkonzentrationen (in  $\mu\text{mol/l}$ ). Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung.

Parameter	Normwert	VorSt <sup>°</sup>	Schwimmen <sup>°</sup>	Rad <sup>°</sup>	Ziel <sup>°</sup>	Änderung in % <sup>a</sup>
Cys	10 – 90	9 $\pm$ 5	11 $\pm$ 6	9 $\pm$ 5	9 $\pm$ 5	0 %
Arg	30 – 145	55 $\pm$ 12	66 $\pm$ 16	42 $\pm$ 11 †	55 $\pm$ 11	0 %
Gln	420 – 700	538 $\pm$ 67	499 $\pm$ 42	488 $\pm$ 61	534 $\pm$ 76	- 1 %
His	30 – 110	76 $\pm$ 14	76 $\pm$ 12	69 $\pm$ 11	75 $\pm$ 17	- 1 %

<sup>°</sup> Zeitpunkte der Blutabnahmen: s. Tab. 2

†  $p < 0,05$  für den Vergleich zum VorSt, ‡  $p < 0,01$  für den Vergleich zum VorSt

<sup>a</sup> Prozentuale Änderung von VorSt bis Ziel

derungen vor und nach der Belastung auf, was auf unterschiedliche Belastungsdauern und -intensitäten sowie differente Nahrungsaufnahme während der Belastung hinweist. Ursächlich für die in der Summe reduzierten Plasmaamino-säuren ist vermutlich ein Netto-Abbau (Proteindegradation > Proteinsynthese) mit Verwendung der Aminosäuren für Transaminierung, Oxidation und Gluconeogenese (5, 15, 23, 30, 47). Abhängig von der Zeitdauer und Intensität der Be-

mit auch dem Stickstofftransport. Von den nichtessentiellen Aminosäuren hat Prolin die höchste energetische Potenz, weil es beim vollständigen Abbau 33 mol ATP bilden kann. Einen ähnlich hohen Shift von Prolin zu Glutamat im Leberstoffwechsel fanden *Lehmann et al* (30).

Die Reduktion von Orn erklärt sich möglicherweise über eine belastungsinduzierte Hemmung der Ureogenese (6).

Ala wird als Präkursor wird im Rahmen des Glukose-Alanin-Zyklus für die Synthese der Glukose bei Kohlenhydratmangel bevorzugt benutzt (16). Die BCAA liefern während der Transaminierung die Aminogruppen für die Bildung des Ala (22). Eine belastungsabhängige Abnahme des Ala wird regelmäßig bei Langzeitbelastungen gefunden (8, 13, 23, 30, 43). Die Glykogenspeicher können bei Langzeitbelastungen um mehr als 70 % reduziert werden. Die Entleerung der muskulären Glykogendepots führt dann konsequenterweise zu einer reduzierten Pyruvatbildung und zu einer eingeschränkten Alaninbildung (23). In diesem Fall gewinnt die de novo Glukosesynthese aus glukogenen Aminosäuren an Bedeutung..

Ein typischer Befund nach mehrstündigen Ausdauerbelastungen (Langtriathlon, Marathonlauf) ist eine Reduktion des Gln (8, 13, 37, 41, 45). Gln wird von Zellen des Immunsystems, besonders von Lymphocyten und Macrophagen metabolisiert. Die Abnahme des Gln nach Ausdauerbelastungen wird als Indikator für einen Überlastungszustand angesehen (40, 46) und ist Ausdruck einer Infektgefährdung im Sinne einer Verminderung der Immunkompetenz (9, 28). Die untersuchte Triathlonbelastung führte zu einer Abnahme des Gln nach dem Radfahren, eine mit Literaturbefunden identische Regulation.

Als Erklärung für die gestiegenen Konzentrationen von Tau, Phe und Tyr wird, neben einem verminderten hepatischen Uptake bzw. muskulären Metabolismus, eine Netto-Freisetzung aus der Muskulatur diskutiert (1, 5, 10, 23, 49). Da es sich bei dieser Arbeit um Daten aus einer Feldstudie handelt, müssen gewisse Limitationen bei der Interpretation beachtet werden. Erstens konnte die Bestimmung der VorSt-Werte nur am Abend vor dem Start durchgeführt werden, da die meisten Teilnehmer erst kurz vor Beginn des Wettkampfs angereist waren. Dadurch konnten keine definierten Ruhe- und Ernährungsbedingungen eingehalten werden. Ebenso konnten die Probanden im Verlauf, auch wenn es sicher wünschenswert gewesen wäre, nicht nachbeobachtet werden, da sie die Wettkampfstätte spätestens am Morgen nach der Siegerehrung verließen. Zweitens wurde bei der Interpretation der Ergebnisse die zirkadiane Rhythmik vernachlässigt, was sinnvoll erschien bei der zunehmend größeren Abweichung in den Ankunftszeiten nach den jeweiligen Disziplinen. Drittens musste auf die kontinuierliche Aufzeichnung der Nahrungsaufnahme und Urinproduktion aus Gründen der Compliance der Probanden und der Logistik verzichtet werden.

Zusammenfassend weisen die Ergebnisse dieser Untersuchungen darauf hin, dass bei Sicherung einer noch stabilen Stoffwechsellage durch fortlaufende Energieaufnahme, starke Aktivierung der Lipolyse und die in den Plasmaami-

nosäurenverschiebungen deutlich erkennbare Katabolie auch extreme Belastungen physisch und psychisch durchgehalten werden. Aus metabolen Gründen erfolgten keine Belastungsabbrüche, da die Athleten aus Erfahrung reichlich Flüssigkeit und Nahrung aufnahmen.

Trotz der hohen mentalen und trainingsmethodischen Anforderungen nimmt das Interesse von Sportlern an ultralangen Distanzen zu. Sportmedizinisch ergibt sich hieraus weiterer Untersuchungsbedarf. Die Zahl der Extremsportler steigt weltweit an. Allein in den USA erhöhte sich die Zahl der Finisher bei Ultramarathons (Distanzen länger als ein Marathonlauf) von 2.380 bei 78 Rennen (1979) auf 16.369 bei 315 Rennen (1999) (36). Zum Schutz der Athleten vor metaboler Überforderung (extremer Proteinkatabolismus, sehr hohe CK-Anstiege, u.v.m.) sollten sportmedizinische Untersuchungen im Sinne präventiv-medizinischer Aspekte verstärkt werden. Da die meisten Athleten Mehrfachwiederholer in diesem Wettkampf waren, darf mittelfristig eine leistungsphysiologische Verträglichkeit dieser Belastung, nach entsprechend längerer Regeneration, angenommen werden. Als relativ junge Sportart (erster doppelter Langtriathlon 1985) sind dennoch die Spätfolgen des Langtriathlons noch nicht absehbar, weshalb katamnestische Nachfolgeuntersuchungen angezeigt sind.

## Literatur

1. *Bazzarre TL, Murdoch SD, Wu SM, Herr DG, Snider IP*: Plasma amino acid responses of trained athletes to two successive exhaustion trials with and without interim carbohydrate feeding. *J Am Coll Nutr* 11 (1992) 501-511.
2. *Björntorp P*: The effects of exercise on plasma insulin. *Int J Sports Med* 2 (1981) 125-129.
3. *Blomstrand E, Celsing F, Newsholme EA*: Changes in plasma concentrations of aromatic and branched-chain amino acids during sustained exercise in man and their possible role in fatigue. *Acta Physiol Scand* 133 (1988) 115-121.
4. *Blomstrand E, Hassmén P, Ekblom B, Newsholme EA*: Administration of branched-chain amino acids during sustained exercise - effects on performance and on plasma concentration of some amino acids. *Eur J Appl Physiol* 63 (1991) 83-88.
5. *Blomstrand E, Saltin B*: Effect of muscle glycogen on glucose, lactate and amino acid metabolism during exercise and recovery in human subjects. *J Physiol (Lond)* 514 (1999) 293-302.
6. *Brodan V, Kuhn E, Pechar J, Tomkova D*: Changes of free amino acids in plasma of healthy subjects induced by physical exercise. *Eur J Appl Physiol* 35 (1976) 69-77.
7. *Brooks GA*: Amino acid and protein metabolism during exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 19 Suppl (1987) S150-S156.
8. *Castell LM, Poortmans JR, Leclercq R, Brasseur M, Duchateau J, Newsholme EA*: Some aspects of the acute phase response after a marathon race, and the effects of glutamine supplementation. *Eur J Appl Physiol* 75 (1997) 47-53.
9. *Castell LM, Newsholme EA*: Glutamine and the effects of exhaustive exercise upon the immune response. *Can J Physiol Pharmacol* 76 (1998) 524-532.
10. *Conlay LA, Wurtman RJ, Lopez G-Coviella I, Blusztajn JK, Vacanti CA, Lague M, During M, Caballero B, Maher TJ, Evoniuk G*: Effects of running the Boston marathon on plasma concentrations of large neutral amino acids. *J Neural Transm* 76 (1989) 65-71.
11. *Costill DL*: Physiology of marathon running. *JAMA* 9 (1972) 1024-1029.
12. *Curzon G, Friedel J, Knott PJ*: The effect of fatty acids on the binding of tryptophan to plasma protein. *Nature* 242 (1973) 198-200.
13. *Décombaz J, Reinhardt P, Anantharaman K, von Glutz G, Poortmans JR*: Biochemical changes in a 100 km run: Free amino acids, urea, and creatinine. *Eur J Appl Physiol* 41 (1979) 61-72.

14. *Dilg HJ*: Jahrbuch der Ultra-Langtriatlons von 1985-1996. Band 3, Selbstverlag, 1997.
15. *Dohm GL, Tapscott EB, Kasperek GJ*: Protein degradation during endurance exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 19 (Suppl 5) (1987) S166-171.
16. *Felig P, Wahren J*: Amino acid metabolism in exercising man. *J Clin Invest* 50 (1971) 2703-2714.
17. *Felig P, Wahren J*: Fuel homeostasis in exercise. *New Engl J Med* 293 (1975) 1078-1084.
18. *Fernstrom MH, Fernstrom DJ*: Large change in serum free tryptophan levels do not alter brain tryptophan levels: studies in streptozotocin-diabetic rats. *Life Sci* 52 (1993) 907-916.
19. *Fischer HG, Karbach P, Lillis A, Hollmann W*: The metabolic relation between ammonia/urea and hypoxanthine/uric acid during and after strength- and endurance-exercises. *Dtsch Z Sportmed* 42 Suppl (1991) 499-505.
20. *Gibson H, Edwards RHT*: Muscular exercise and fatigue. *Sports Med* 2 (1985) 120-132.
21. *Haralambie G, Berg A*: Serum urea and nitrogen changes with exercise duration. *Eur J Appl Physiol* 36 (1976) 39-48.
22. *Haymond MW, Miles JM*: Branched-chain amino acids as a major source of alanin nitrogen in man. *Diabetes* 31 (1982) 86-89.
23. *Henriksson J*: Effects of exercise on amino acid concentrations in skeletal muscle and plasma. *J Exp Biol* 160 (1991) 149-165.
24. *Huq F, Martin T, Ruell P*: Changes in serum amino acid concentrations during prolonged endurance running. *Jap J Physiol* 43 (1993) 797-807.
25. *Irving RA, Noakes TD, van Zyl Smit R*: Metabolic and renal changes in two athletes during a world 24 hour relay record performance. *Br J Sp Med* 23 (1989) 227-232.
26. *Jürimäe T, Viru A, Karelson K, Smirnova T*: Biochemical changes during the long and short triathlon competition. *J Sports Med Phys Fitness* 29 (1989) 305-309.
27. *Keul J, Kohler B, Glutz G von, Lüthi U, Berg A, Howald H*: Biochemical changes in a 100 km run: Carbohydrates, lipids, and hormones in serum. *Eur J Appl Physiol* 47 (1981) 181-189.
28. *Kingsbury KJ, Kay L, Hjelm M*: Contrasting plasma free amino acids patterns in elite athletes: association with fatigue and infection. *Br J Sports Med* 32 (1998) 25-33.
29. *Lamon-Fava S, McNamara JR, Farber HW, Hill NS, Schaefer EJ*: Acute changes in lipid, lipoprotein, apolipoprotein, and low-density lipoprotein particle size after an endurance triathlon. *Metabolism* 38 (1989) 921-925.
30. *Lehmann M, Huonker M, Dimeo F, Heinz N, Gastmann U, Treis N, Steinacker JM, Keul J, Kojewski R, Häussinger D*: Serum amino acid concentrations in nine athletes before and after the 1993 Colmar ultra triathlon. *Int J Sports Med* 16 (1995) 155-159.
31. *McKechnie JK, Leary WP, Noakes TD*: Metabolic responses to a 90 km running race. *S Afr Med J* 61 (1982) 482-485.
32. *Nageel D, Seiler D, Franz H*: Biochemical, hematological and endocrinological parameters during repeated intense short-term running in comparison to ultra-long-distance running. *Int J Sports Med* 13 (1992) 337-343.
33. *Neumann G, Reuter I*: Kohlenhydratbilanzierung beim Kurztriatlon. in: Bremer D (Red.): Triathlon: orthopädische und internistische Aspekte. Czwalina, Hamburg (1993) 91-99.
34. *Neumann G, Schüler KP*: Sportmedizinische Funktionsdiagnostik. Leipzig, Barth, 1994.
35. *Neumann G*: Dosierung und Nutzen von Kohlenhydrataufnahmen bei Ausdauerleistungen. in: Engelhardt M (Red.): Internationales Triathlon-Symposium. Czwalina, Hamburg (1996) 7-22.
36. North American Ultra Lists 1999. Ultrarunning 19 (March 2000) 67.
37. *Newsholme EA*: Biochemical mechanisms to explain immunosuppression in well-trained and overtrained athletes. *Int J Sports Med* 15 Suppl (1994) S142-S147.
38. *Newsholme EA, Blomstrand E*: Tryptophan, 5-Hydroxytryptamin and a possible explanation for central fatigue. *Adv Exp Med Biol* 384 (1995) 315-320.
39. *Noakes TD, Carter JW*: Biochemical parameters in athletes before and after having run 160 kilometres. *S Afr Med J* 50 (1976) 1562-1566.
40. *Parry-Billings M, Blomstrand E, McAndrew N, Newsholme EA*: A communicational link between skeletal muscle, brain, and cells of the immune system. *Int J Sports Med* 11 Suppl (1990) S122-S128.
41. *Parry-Billings M, Budgett R, Koutedakis Y, Blomstrand E, Brooks S, Williams C, Calder PC, Pilling S, Baigrie R, Newsholme EA*: Plasma amino acid concentrations in the overtraining syndrome: possible effects on the immune system. *Med Sci Sports Exerc* 24 (1992) 1353-1358.
42. *Partridge WM*: Brain metabolism: A perspective from the blood-brain-barrier. *Physiol Rev* 63 (1983) 1481-1535.
43. *Refsum HE, Gjessing LR, Stromme SB*: Changes in plasma amino acid distribution and urine amino acids excretion during prolonged heavy exercise. *Scand J Clin Lab Invest* 39 (1979) 407-413.
44. *Rensburg JP van, Kielblock AJ, Van der Linde A*: Physiologic and biochemical changes during a triathlon competition. *Int J Sports Med* 7 (1986) 30-35.
45. *Rohde T, MacLean DA, Hartkopp A, Pedersen BK*: The immune system and serum glutamine during a triathlon. *Eur J Appl Physiol* 74 (1996) 428-434.
46. *Rowbottom DG, Keast D, Morton AR*: The emerging role of glutamin as an indicator of exercise stress and overtraining. *Sports Med* 21 (1996) 80-97.
47. *Van Hall G, Saltin B, Wagenmakers AJM*: Muscle protein degradation and amino acid metabolism during prolonged knee-extensor exercise in humans. *Clin Sci (Colch)* 97 (1999) 557-567.
48. *Wagenmakers AJM, Coakley JH, Edwards RHT*: Metabolism of branched-chain amino acids and ammonia during exercise: clues from McArdle's disease. *Int J Sports Med* 11 Suppl (1990) S101-S113.
49. *Ward RJ, Francaux M, Cuisinier C, Sturbois X, De Witte P*: Changes in plasma taurine levels after different endurance events. *Amino Acids* 16 (1999) 71-77.

Korrespondenzadresse:

Dr. Oliver Volk

Heyenbaumstraße 115a, 47802 Krefeld

e-mail: o.volk@freenet.de