

Simone Hegner<sup>1</sup>, Michaela Stucki<sup>1</sup>, Roman Trepp<sup>2</sup>, Hans Hoppeler<sup>1</sup>, Michael Vogt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Anatomie, Universität Bern, Baltzerstrasse 2, CH-3000 Bern 9

<sup>2</sup> Inselspital, Universitätsspital Bern, CH-3010 Bern

# Regeneration mit aminosäurehaltigen Kohlenhydratgetränken

## Zusammenfassung

Kohlenhydratgetränke, welche Weizenproteinhydrolysate, Leucin und Phenylalanin enthalten, beschleunigen die Regenerationsprozesse und helfen Sportlern, ihre Flüssigkeits- und Energiespeicher nach grossen Belastungen möglichst rasch wieder aufzufüllen. Die Verstärkung der Insulinantwort durch solche Getränke scheint für die regenerationsfördernde Wirkung entscheidend zu sein. Es ist jedoch unklar, wie sich solche Getränke auf die Leistung in einer unmittelbar nachfolgenden Trainings- oder Wettkampfeinheit auswirken. Wir untersuchten deswegen die Auswirkungen von 3 unterschiedlich zusammengesetzten Testgetränken auf die Insulin- und Glukoseantwort während einer 4-h-Regenerationsphase sowie auf die Leistung in einem anschliessenden Belastungstest. Zusätzlich evaluierten wir den Geschmack dieser Getränke. 5 männliche Ausdauersportler ( $\text{VO}_2\text{max} \approx 60 \text{ ml/min/kg}$ ) traten dreimal im Abstand von je 1 Woche zu einem Testtermin an. Zuerst absolvierten sie auf dem Fahrradergometer einen standardisierten Belastungstest (T1) und danach eine erschöpfende Belastung zur Entleerung der Glykogenspeicher. Während der nachfolgenden 4-h-Regenerationsphase nahmen sie im Doppelblind-Verfahren 1 von 3 Testgetränken ein (Getränk L: Kohlenhydrate, Proteinhydrolysat und Leucin; Getränk LP: Kohlenhydrate, Proteinhydrolysat, Leucin und Phenylalanin; Getränk C: gewöhnliches Kohlenhydratgetränk). Dabei wurde die Insulin- und Glukoseantwort bestimmt. Am Ende der Regenerationsphase beurteilten die Versuchspersonen den Geschmack der Testgetränke. Unmittelbar danach absolvierten sie den Belastungstest ein 2. Mal (T2). Dabei wurden die Ausdauer-Kapazität (Zeit bis zur Erschöpfung bei einer Belastung von 90% der Maximalleistung), die Ventilation, die Blutlaktatkonzentration, die Herzfrequenz und das subjektive Belastungsempfinden erfasst. Die Einnahme der aminosäurehaltigen Testgetränke führte im Vergleich zum gewöhnlichen Kohlenhydratgetränk zu einer stärkeren Insulin- (L:  $286 \pm 128 \text{ mU/l}$ , LP:  $211 \pm 44 \text{ mU/l}$ , C:  $127 \pm 57 \text{ mU/l}$ ) und einer schwächeren Glukoseantwort (L:  $24.5 \pm 2.0 \text{ mmol/l}$ , LP:  $23.6 \pm 3.4 \text{ mmol/l}$ , C:  $26.1 \pm 2.0 \text{ mmol/l}$ ). Die Zusammensetzung der Testgetränke hatte keinen unterschiedlichen Effekt auf die Blutlaktatkonzentration (L:  $7.28 \pm 1.01 \text{ mmol/l}$ , LP  $7.10 \pm 1.70 \text{ mmol/l}$ , C:  $7.00 \pm 1.59 \text{ mmol/l}$ ) und die Ausdauerkapazität (L:  $5.3 \pm 1.6 \text{ min}$ , LP:  $5.7 \pm 2.7 \text{ min}$ , C:  $5.9 \pm 1.6 \text{ min}$ ) in T2 unmittelbar nach der 4-h-Regenerationsphase. Die Supplementierung von Phenylalanin scheint sich positiv auf das subjektive Belastungsempfinden auszuwirken: während nach Einnahme von Getränk L und C die Anstrengung in T2 härter als in T1 eingestuft wurde (aufsummierte Borgwerte: L: T1:  $36.2 \pm 3.3$ , T2:  $39.4 \pm 2.1$ ; C: T1:  $35.4 \pm 1.8$ , T2:  $39.4 \pm 2.1$ ), fanden wir für Getränk LP keinen Unterschied im subjektiven Empfinden zwischen T2 ( $38.6 \pm 1.5$ ) und T1 ( $36.4 \pm 3.0$ ). Der Geschmack der zwei aminosäurehaltigen Getränke wurde als weniger angenehm empfunden als derjenige des gewöhnlichen Kohlenhydratgetränks. Wir folgern, dass aminosäurehaltige Kohlenhydratgetränke, die in der Regenerationsphase konsumiert werden, eine starke Insulinausschüttung

## Abstract

After an effort-related depletion, athletes have to refill their energy and fluid stores within a very short period of time. Special sports drinks can enhance this process. Carbohydrate drinks containing wheat protein and certain specific amino acids seem to be especially effective. They can elicit a high insulin response. However, the effects of such drinks on sports performed immediately after consumption are unknown so far. We investigated the effects of 3 different drinks on the insulin and glucose response in a 4-h-regeneration period as well as on performance in sports practiced immediately after consumption. Furthermore, we evaluated the taste of such drinks. 5 male endurance athletes ( $\text{VO}_2\text{max} \approx 60 \text{ ml/min/kg}$ ) were subjected to an equal test procedure 3 times at weekly intervals. First, they had to complete a performance test and afterwards a strenuous effort on a cycle ergometer to deplete their glycogen stores. During the following 4-h-regeneration period, the subjects took 1 of 3 test beverages (double-blind-study). The test beverages contained different amounts of the amino acids leucine and phenylalanine and wheat protein hydrolysate (drink L: carbohydrate, wheat protein hydrolysate, and leucine; drink LP: carbohydrate, wheat protein hydrolysate, leucine, and phenylalanine; drink C: regular carbohydrate drink). The subject's glucose and insulin blood concentrations were measured. At the end of the regeneration period, the subjects were asked to rate the taste of the test beverages. Thereafter, a second performance test had to be completed. Endurance capacity (time to exhaustion at 90% of maximum performance), heart rate, ventilation, blood lactate concentration, and subjective perceived exertion were quantified. The drinks containing amino acids induced a higher insulin response (L:  $286 \pm 128 \text{ mU/l}$ , LP:  $211 \pm 44 \text{ mU/l}$ , C:  $127 \pm 57 \text{ mU/l}$ ) and a lower glucose concentration (L:  $24.5 \pm 2.0 \text{ mmol/l}$ , LP:  $23.6 \pm 3.4 \text{ mmol/l}$ , C:  $26.1 \pm 2.0 \text{ mmol/l}$ ) than the standard carbohydrate drink. The composition of the drinks did not lead to different blood lactate concentrations or variable endurance capacities in the second performance test (L:  $5.3 \pm 1.6 \text{ min}$ , LP:  $5.7 \pm 2.7 \text{ min}$ , C:  $5.9 \pm 1.6 \text{ min}$ ). The consumption of drinks containing amino acids had no negative effects on performance immediately after the regeneration period. Subjective perceived exertion was the same as in the first performance test only if the subjects had consumed the drink containing both, leucine and phenylalanine (total sum of Borg points: T1:  $36.4 \pm 3.0$ , T2:  $38.6 \pm 1.5$ ). For the 2 other test drinks, subjective perceived exertion was higher in the second performance test (L: T1:  $36.2 \pm 3.3$ , T2:  $39.4 \pm 2.1$ ; C: T1:  $35.4 \pm 1.8$ , T2:  $39.4 \pm 2.1$ ). In comparison to the carbohydrate drink, taste was rated worse for amino acid containing drinks. We conclude that carbohydrate drinks containing amino acids, consumed during regeneration, can elicit a high insulin response and support regeneration processes. Such drinks can be consumed until 1 h prior to a training session or a competition without having negative effects on performance. Compared to standard carbohydrate drinks, they do

bewirken, was die Regenerationsprozesse fördern kann. Die Supplementierung mit aminosäurehaltigen Getränken scheint im Vergleich zu gewöhnlichen Kohlenhydratgetränken nach einer kurzen 4-h-Erholungsphase keinen Leistungsvorteil im hochintensiven Bereich zu bringen. Insgesamt empfehlen wir für die unmittelbare Regeneration nach intensiven Trainingsbelastungen die Verwendung von Getränken mit hoch dosiertem Leucin und Phenylalanin (je 14.5g/l). Der Geschmack von Sportgetränken mit hoher Aminosäurenkonzentration ist gewöhnungsbedürftig.

not have any favorable effects on highly intensive performance after a 4-h-regeneration period. We recommend carbohydrate drinks containing high doses of leucine and phenylalanine (14.5g/l) after highly intense training performances. One has to adapt to the taste of highly dosed amino acid drinks. It is worth to test drinks containing amino acids in training sessions before using them in a competition.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 58 (3), 69–77, 2010

## 1. Einleitung

### 1.1 Optimierung der Regeneration durch Sportgetränke

Nach sportlichen Leistungen müssen für eine optimale Erholung die Elektrolyt- und Flüssigkeitsverluste innert kurzer Zeit ersetzt und die Glykogenspeicher rasch wieder aufgefüllt werden [11,13,15,20,24,32,43,44,49,51]. Kohlenhydratreiche, sog. isotonische Sportgetränke haben sich für diesen Zweck etabliert [5,42,50]. Muskuläre Beanspruchung einerseits und Insulin andererseits begünstigen den Glukosetransport durch die Muskelfasermembran und die Glykogensynthese [12,14,38,39,51]. Um die anabole und damit regenerative Wirkung der Kohlenhydratgetränke zu erhöhen, werden diesen Proteine beigemischt [53]. Van Loon et al. [45,47] zeigen, dass durch die Beigabe von Leucin und Phenylalanin zu proteinhaltigen Kohlenhydratgetränken die Insulinsekretion wie auch die Glykogensynthese zusätzlich gesteigert werden kann. Kaastra et al. [16] stellen fest, dass die insulinstimulierende Wirkung vor allem dem Leucin zuzuschreiben ist. Andere Arbeiten zeigen kontroverse Resultate in Bezug auf den Effekt von Proteinen und Aminosäuren auf die Glykogen- und Proteinsynthese [1,14,26,27,40]. Leider ist der Geschmack dieser aminosäurehaltigen Getränke unbefriedigend. Deshalb haben wir in den vergangenen Jahren eine angepasste Version des aminosäurehaltigen Getränks, wie von Van Loon et al. [45] vorgeschlagen, in den Sportarten Ski Alpin, Langlauf, nordische Kombination und Radsport eingesetzt. Durch die Zugabe von künstlichem Fruchtroma und Zitronensäure konnte der Geschmack gegenüber der Originalrezeptur deutlich verbessert werden. Viele Sportler berichteten über positive Effekte. Einige beklagten jedoch nach wie vor den bitteren Geschmack.

### 1.2 Fragestellung

Es ist nicht bekannt, inwiefern die erhöhten Insulinkonzentrationen nach Einnahme von aminosäurehaltigen Getränken die Leistung in einem nachfolgenden Wettkampf oder Training beeinflussen. Wir verglichen deshalb die Wirkung eines adaptierten leucin- und phenylalaninhalten Regenerationsgetränks [45] mit dem Effekt eines gewöhnlichen Kohlenhydratgetränks auf die Insulinsekretion während einer 4-h-Nachbelastungsphase sowie auf die Ausdauerkapazität in einem nachfolgenden Belastungstest.

## 2. Methoden

### 2.1 Versuchspersonen

Als Versuchspersonen (VP) wurden junge, männliche Ausdauersportler gesucht. Die 5 an der Studie teilnehmenden Sportler waren durchschnittlich  $23.8 \pm 10.7$  Jahre alt (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung),  $1.80 \pm 0.09$  m gross,  $71.2 \pm 5.8$  kg schwer und hatten einen Körperfettanteil von  $6.9 \pm 1.6\%$ .  $VO_{2max}$  betrug  $59.9 \pm 2.7$  ml/min/kg und die VP erreichten im ergospirometrischen Stufentest auf dem Fahrrad eine maximale Leistung ( $P_{max}$ ) von  $373.3 \pm 43.0$  W resp.  $5.2 \pm 0.2$  W/kg. Die Studie wurde durch die Ethikkommission des Kantons Bern bewilligt.

### 2.2 Testgetränke

3 Testgetränke wurden untersucht: Getränk L enthielt die Aminosäure Leucin (14.5 g/l; Dolder, Basel, Schweiz), Weizenprotein-Hydrolysat (29 g/l; Quest International, Naarden, Niederlande) und Kohlenhydrate (172 g/l); Getränk LP enthielt Leucin (14.5 g/l) und Phenylalanin (14.5 g/l; Dolder, Basel, Schweiz), Weizenprotein-Hydrolysat (29 g/l) und Kohlenhydrate (172 g/l); Getränk C enthielt nur Kohlenhydrate (172 g/l). Als Kohlenhydratquelle wurden zu gleichen Teilen Glukose und Maltodextrin (Blattmann Cerestar, Wädenswil, Schweiz) verwendet. Alle Testgetränke waren zudem mit Vitamin C und E (90 mg/l bzw. 15 mg/l; Hänseler, Herisau, Schweiz), Betacarotin (7 mg/l; Stärke & Nagler, Zollikon, Schweiz), Selenhefe (75 ug/l; Hänseler, Herisau, Schweiz), Orangenaroma (Stärke & Nagler, Zollikon, Schweiz), den künstlichen Süsstoffen Saccharin und Aspartam (Hänseler, Herisau, Schweiz) sowie Zitronensäure (Hänseler, Herisau, Schweiz) ergänzt. Die Testgetränke wurden am Tag vor der Verabreichung durch Einrühren des entsprechenden Pulvers in Wasser zubereitet. Dabei bildeten die aminosäurehaltigen Getränke Schaum, der sich unter Kühlung bei 4 °C rasch auflöste. Die benötigten Getränkemischungen wurden durch eine an der Untersuchung nicht beteiligte Person zubereitet und zur doppelblinden Verabreichung codiert. Die Auflösung der Verschlüsselung erfolgte nach der Datenauswertung.

### 2.3 Material und Umgebungsbedingungen

Alle Tests wurden auf einem Fahrradergometer (Ergoline, Bitz, Deutschland) mit Spirometrie (Oxycon Alpha, Jaeger, Höchberg, Deutschland) und Herzfrequenzmessung (Accurex Plus, Polar, Kempele, Finnland) durchgeführt. Die Spirometrieanlage wurde vor jedem Test neu kalibriert. Zur Bestimmung der Blutlaktat- und Blutglukosekonzentrationen während der Belastungstests wurde an einem Finger der rechten Hand kapilläres Blut entnommen und analysiert (LactatePro, AxonLab, Baden, Schweiz; Reflotron, Roche Diagnostic, Zug, Schweiz). Das subjektive Belastungsempfinden wurde mittels Skala nach Borg (6 bis 20) erfasst [2,3,37]. Die Luftfeuchtigkeit lag während den Tests zwischen 52 und 70%, und die Raumtemperatur betrug  $24 \pm 1$  °C. Ein Ventilator sorgte für kontinuierliche Luftzirkulation.

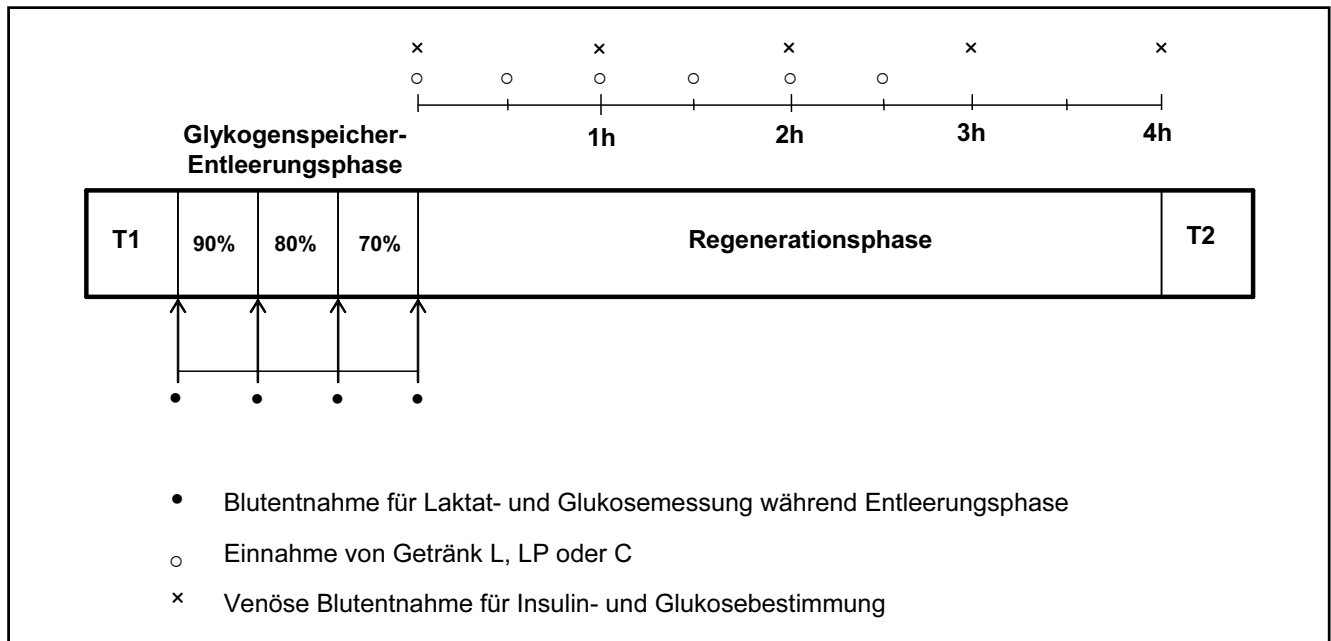
### 2.4 Ablauf der Untersuchungen

#### 2.4.1 Ergospirometrischer Stufentest ( $VO_{2max}$ -Test)

Zur Bestimmung von  $VO_{2max}$ ,  $P_{max}$  und der individuellen Belastungsvorgaben für die Belastungstests und die Glykogenspeicher-Entleerungsphase, wurde im Rahmen einer Voruntersuchung ein ergospirometrischer Stufentest durchgeführt: Nach einer Anfangsbelastung von 100 W wurde die Belastung alle 3 min um 30 W erhöht. Als Abbruchkriterium wurde das Nicht-Einhalten einer minimalen Tretfrequenz von 60 U/min festgelegt.

#### 2.4.2 Untersuchungsdesign

Die VP traten dreimal im zeitlichen Abstand von je 1 Woche zu einem Testtermin (TT) an. Sie wurden angewiesen, sich in den 2 Tagen vor jedem TT möglichst gleich zu ernähren und pro Tag höchstens 1 h Sport bei geringer Intensität zu treiben.



Figur 1: Studiendesign

T1: Belastungstest 1, T2: Belastungstest 2, Getränk L: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat und Leucin, Getränk LP: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat, Leucin und Phenylalanin, Getränk C: Kohlenhydrate.

Nahrungsaufnahme und körperliche Aktivitäten während der letzten 48 h vor den TT wurden durch die VP protokolliert. Der Testablauf war an allen 3 TT identisch (Figur 1): 1. Bestimmung der Körpermasse, 2. Belastungstest 1 (T1), 3. Glykogenspeicher-Entleerungsphase, 4. 4-h-Regenerationsphase, 5. Belastungstest 2 (T2).

#### 2.4.3 Belastungstests T1 und T2

Die 2 Belastungstests T1 und T2 waren bezüglich Belastungsvorgaben identisch: nach einer 5-min-Ruhephase (sitzend auf dem Fahrradergometer) wurden die VP 10 min bei 40%  $P_{max}$  belastet, danach folgten 4 min bei 60%  $P_{max}$  und dann 4 min bei 80%  $P_{max}$ . Anschliessend wurde bei 90%  $P_{max}$  weitergearbeitet, bis die minimale Tretfrequenz von 60 U/min nicht mehr eingehalten werden konnte. Bestimmt wurde die Zeit, während der die Leistung von 90%  $P_{max}$  aufrechterhalten werden konnte. Während der Belastungstests wurden Herzfrequenz und Ventilation kontinuierlich aufgezeichnet. Die Bestimmung der Blutlaktatkonzentration und des subjektiven Belastungsempfindens erfolgte jeweils am Ende jeder Belastungsstufe. Die Blutlaktatkonzentration bei den submaximalen Belastungsstufen (in Ruhe, bei 40%, 60% und 80%  $P_{max}$ ) wurden als indirektes Mass für den Zustand der muskulären Glykogenspeicher verwendet. Das subjektive Belastungsempfinden wurde in T1 und T2 während den ersten 3 Belastungsstufen (40%, 60% und 80%  $P_{max}$ ) aufsummiert (Borgsumme). Der respiratorische Quotient (RQ) als indirektes Mass zur Abschätzung der Substratselektion wurde während der letzten 2 min auf der Belastungsstufe 40%  $P_{max}$  ermittelt. Die VP durften während der Belastungstests weder trinken noch essen und erhielten keine Zeitangaben.

#### 2.4.4 Glykogenspeicher-Entleerungsphase

Im Anschluss an den Belastungstest T1 wurden die muskulären Glykogenspeicher gemäss Protokoll von Keizer et al. [19] entleert: Auf dem Fahrradergometer wurden alternierend Zyklen zu je 2 min bei 90% und 50%  $P_{max}$  absolviert, bis die Belastung bei 90%  $P_{max}$  nicht mehr während 2 min aufrechterhalten werden konnte. Danach folgten alternierend Zyklen zu je 2 min bei 80% und 50%  $P_{max}$  und schliesslich bei 70% und 50%  $P_{max}$ , bis auch die Belastung bei 70%  $P_{max}$  abgebrochen werden musste.

Beim 1. TT durfte während der Glykogenspeicher-Entleerungsphase beliebig viel Wasser getrunken werden. Die Anzahl Zyklen

und die Trinkmenge wurden für die nachfolgenden TT beibehalten. Während der Entleerungsphase wurden die Blutlaktat- und Blutglukosekonzentration stündlich gemessen.

#### 2.4.5 Regenerationsphase

Nach der Glykogenspeicher-Entleerungsphase folgte die 4-h-Regenerationsphase, in welcher alle 30 min (Zeitpunkte 0, 30, 60, 90, 120 und 150 min nach Beendigung der Entleerungsphase) 3.5 ml/kg Körpermasse von einem der 3 Testgetränke eingenommen wurden. Die Supplementation erfolgte im Doppelblindverfahren. Ausser dem Testgetränk durfte während der Regenerationsphase nichts anderes konsumiert werden.

Zu Beginn der Regenerationsphase und nach 60, 120, 180 und 240 min wurde den VP venöses Blut zur Bestimmung der Glukose- und Insulinkonzentration entnommen. Die Analyse der Blutproben erfolgte im Zentrallabor des Inselspitals Bern. Zur Bestimmung der Insulin- und Glukoseantwort wurden die nach 60, 120, 180 und 240 min gemessenen Werte aufsummiert.

Am Ende der Regenerationsphase beurteilten die VP den Geschmack der Testgetränke anhand eines Fragebogens. Dabei wurden 4 Qualitäten erfasst: Geschmack, Süsseigkeit, Aroma und Gesamteindruck. Zur Quantifizierung wurde eine 5-stufige Skala verwendet ([www.quint-essenz.ch/de/files/Fragebogen\\_20.pdf](http://www.quint-essenz.ch/de/files/Fragebogen_20.pdf)): 5 = sehr gut, 4 = gut, 3 = befriedigend, 2 = unbefriedigend und 1 = sehr schlecht.

Unmittelbar nach der Regenerationsphase wurde der 2. Belastungstest (T2) gestartet.

#### 2.5 Datenanalyse

Alle Daten sind als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen angegeben. Eine 2-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung (Testgetränk x Zeit) bzw. 1-faktorielle ANOVA (Testgetränk) wurden verwendet, um allfällige Unterschiede zwischen T1 und T2 bzw. unterschiedliche Effekte der 3 Testgetränke auf die Insulin- und Glukoseantwort zu identifizieren. Zur Lokalisation allfälliger Differenzen wurde der post hoc Test LSD von Fisher verwendet. Die statistische Analyse erfolgte mittels Statistica 6.1 (Statsoft, Hamburg, Deutschland). Statistisch signifikante Unterschiede wurden bei  $p < 0.05$ , statistisch tendenziell signifikante Unterschiede bei  $p < 0.1$  angenommen.

### 3. Resultate

#### 3.1 Trainings- und Essverhalten der Versuchspersonen

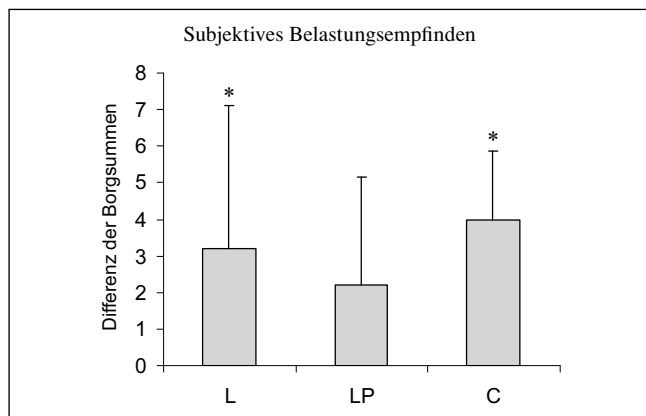
Während der letzten 48 h vor den TT trainierten die VP mit geringer Intensität und in vergleichbarem Umfang ( $148 \pm 75$  min). Die Energiezufuhr ( $3751 \pm 1695$  kcal/Tag) sowie der Kohlenhydrat- und Fettanteil der Nahrung ( $61.9 \pm 2.5$  bzw.  $25.2 \pm 1.6\%$ ), welche in den letzten 48 h vor den TT zugeführt wurde, waren nicht unterschiedlich.

#### 3.2 Ergebnisse der Leistungstests

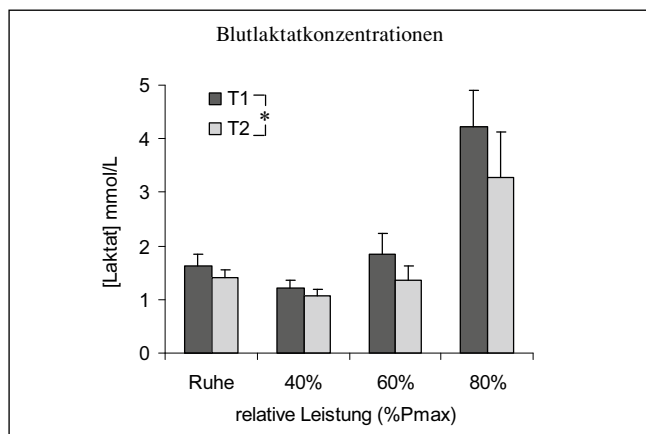
Die Ausdauerkapazität war an allen 3 TT in T2 signifikant tiefer ( $336 \pm 67$  s) als in T1 ( $481 \pm 101$  s,  $p=0.048$ ). Die 3 verschiedenen Testgetränke wirkten sich nicht signifikant unterschiedlich auf die Ausdauerkapazität in T2 aus (L:  $317 \pm 99$  s, LP:  $341 \pm 166$  s, C:  $351 \pm 99$  s,  $p>0.05$ ).

Die durchschnittliche Borgsumme war in T2 bei Testgetränk L (T2:  $39.4 \pm 2.1$ , T1:  $36.2 \pm 3.3$ ,  $p=0.04$ ) und Testgetränk C (T2:  $39.4 \pm 2.1$ , T1:  $35.4 \pm 1.8$ ,  $p=0.01$ ) signifikant höher als in T1 (Figur 2). Nur bei Testgetränk LP war die durchschnittliche Borgsumme in T2 ( $38.6 \pm 1.5$ ) nicht signifikant höher als in T1 ( $36.4 \pm 3.0$ ,  $p=0.13$ ). Die Borgsumme war nach Zufuhr der verschiedenen Testgetränke nicht signifikant unterschiedlich in T2.

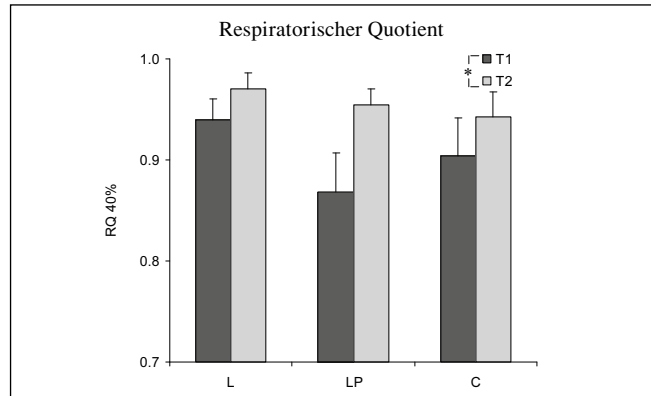
Die über alle 3 TT gemittelten Blutlaktatkonzentrationen der submaximalen Belastungsstufen in T2 waren signifikant tiefer als diejenigen in T1 ( $p<0.001$ , Figur 3). Die unterschiedliche Zusam-



Figur 2: Differenz der Borgsummen T2 – T1 (über die Belastungsstufen 40%, 60%, 80%  $P_{max}$  aufsummierte Borgwerte),  $n=5$ , Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen, \*  $p < 0.05$ . Getränk L: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat und Leucin, Getränk LP: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat, Leucin und Phenylalanin, Getränk C: Kohlenhydrate.



Figur 3: Blutlaktatkonzentration in Ruhe und während der Belastungsstufen 40%, 60%, 80% und 90%  $P_{max}$  der beiden Belastungstests T1 (vor Entleerung) und T2 (nach Entleerung und 4-h-Regenerationsphase).  $n=5$ , Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen, \*  $p < 0.05$ .



Figur 4: Respiratorischer Quotient (RQ) der Belastungsstufe bei 40%  $P_{max}$  in T1 sowie in T2 nach der Regenerationsphase mit Zufuhr der 3 unterschiedlichen Testgetränke. Getränk L: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat und Leucin, Getränk LP: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat, Leucin und Phenylalanin, Getränk C: Kohlenhydrate.  $n=5$ , Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen, \*  $p < 0.05$ .

mensetzung der Testgetränke hatte keinen Einfluss auf die Blutlaktatkonzentration in T2 (L:  $7.2 \pm 1.01$  mmol/l, LP:  $7.10 \pm 1.70$  mmol/l, C:  $7.00 \pm 1.59$  mmol/l;  $p=0.76$ ).

Der RQ bei 40%  $P_{max}$  war in T2 unabhängig vom Testgetränk signifikant höher als in T1 ( $p<0.001$ , Figur 4). Der RQ hat nach Zufuhr des Testgetränks LP tendenziell ( $p=0.07$ ) stärker zugenommen als nach Zufuhr der Testgetränke L und C.

#### 3.3 Insulin- und Glukoseantwort in der Regenerationsphase

Nach Einnahme der Testgetränke war die Insulinkonzentration im Blut erhöht (Figur 5). Während der Regenerationsphase mit Testgetränk L ( $335 \pm 167$  mU/l) war die Insulinantwort signifikant höher als mit Testgetränk C ( $149 \pm 61$  mU/l,  $p=0.02$ ). Keinen signifikanten Unterschied in der Insulinantwort während der Regenerationsphase ergab sich zwischen den Testgetränken L und LP ( $255 \pm 85$  mU/l,  $p=0.29$ ) und zwischen den Testgetränken LP und C ( $p=0.17$ ).

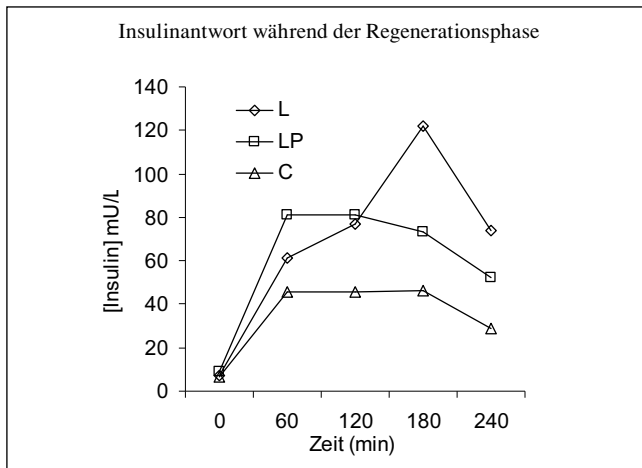
Während der Regenerationsphase mit Testgetränk LP ( $22.0 \pm 4.1$  mmol/l) war die Glukoseantwort (Summe der während der Regenerationsphase stündlich gemessenen Glukosekonzentrationen), (Figur 6) tendenziell tiefer als während derjenigen mit Testgetränk C ( $26.1 \pm 1.8$  mmol/l,  $p=0.06$ ). Keinen signifikanten Unterschied in der Glukoseantwort während der Regenerationsphase ergab sich zwischen den Testgetränken LP und L ( $23.7 \pm 1.5$  mmol/l,  $p=0.46$ ) und zwischen den Testgetränken L und C ( $p=0.20$ ).

#### 3.4 Geschmack und Verträglichkeit

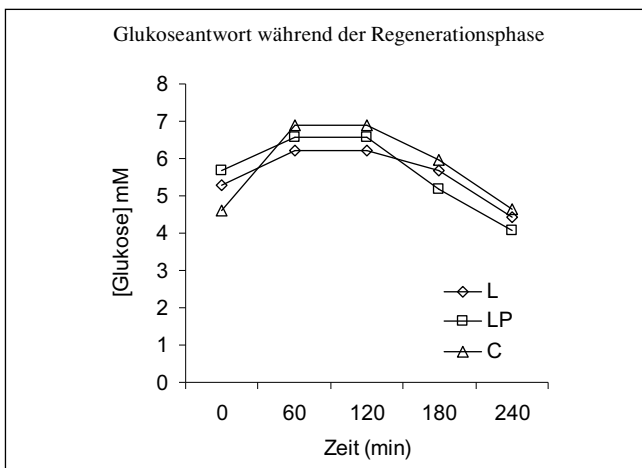
Bei der subjektiven Bewertung des Geschmacks am Ende der 4-h-Regenerationsphase erreichten die Testgetränke auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) folgende durchschnittlichen Werte: Testgetränk LP  $2.0 \pm 0.7$  (unbefriedigend), Testgetränk L  $2.8 \pm 0.5$  (befriedigend) und Testgetränk C  $4.0 \pm 0.0$  (gut). Keine der VP musste den T2 wegen gastrointestinaler Beschwerden frühzeitig abbrechen.

#### 3.5 Entleerung der Glykogenspeicher

Die mittlere Entleerungszeit der Glykogenspeicher betrug  $69.7 \pm 12.3$  min. Bei Annahme eines Wirkungsgrades von 24% beim Fahrradfahren [6,9] wurden für T1 und die Glykogenspeicher-Entleerungsphase zusammen folgende mittlere Energieumsätze berechnet: TT mit Getränk L  $1349 \pm 371$  kcal, mit Getränk LP  $1329 \pm 470$  kcal und mit Getränk C  $1332 \pm 356$  kcal. Unmittelbar nach Beendigung der Entleerungsphase betrug die mittlere Glukosekonzentration im Blut  $5.2 \pm 0.7$  mmol/l. Nach der Entleerungsphase war die Blutglukosekonzentration in den 3 TT nicht unterschiedlich.



Figur 5: Verlauf der Blutinsulinkonzentration während der Regenerationsphase bei Zufuhr von unterschiedlichen Testgetränken. Getränk L: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat und Leucin; Getränk LP: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat, Leucin und Phenylalanin; Getränk C: Kohlenhydrate.



Figur 6: Verlauf der Blutglukosekonzentration während der Regenerationsphase bei Zufuhr von unterschiedlichen Testgetränken. Getränk L: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat und Leucin; Getränk LP: Kohlenhydrate, Weizenprotein-Hydrolysat, Leucin und Phenylalanin; Getränk C: Kohlenhydrate.

## 4. Diskussion

### 4.1 Insulinantwort und Muskelglykogensynthese

Die Insulinantwort in der Regenerationsphase war unter Zufuhr der beiden aminosäurehaltigen Getränke höher als beim gewöhnlichen Kohlenhydratgetränk (Figur 5). Dieser Befund bestätigt die Resultate von Van Loon et al. [47], allerdings mit einem anderen Untersuchungsdesign.

Mit der vorliegenden Untersuchung konnten wir zudem zeigen, dass trotz erhöhter Insulinkonzentrationen während der Einnahme von aminosäurehaltigen Testgetränken die Leistung in einer nachfolgenden hochintensiven Ausdauerbelastung nicht negativ beeinflusst wird. Unsere Resultate weisen darauf hin, dass in kurzen Trainings- oder Wettkampfpausen leucin- und phenylalaninhaltige Getränke eingenommen werden können, ohne dass die nachfolgende Leistung positiv oder negativ beeinflusst wird. Dabei liegt der Vorteil von Leucin darin, dass diese Aminosäure ihren insulinotropen Effekt unabhängig von der Glukosekonzentration entfaltet [33] und direkt oder indirekt (via Insulin) die Muskelproteinsynthese stimuliert [7,18,28,35,40]. Während intensiven Trainings-

phasen (mehrere Trainingseinheiten pro Tag), nach Krafttraining [33] und in Sportarten, bei denen die Pausen zwischen einzelnen intensiven Wettkampfbelastungen kurz sind, erscheint der Einsatz leucinreicher Kohlenhydratgetränke deshalb sinnvoll.

Van Loon et al. [46] zeigen, dass die Glykogen-Syntheserate signifikant erhöht ist, wenn anstelle eines gewöhnlichen Kohlenhydratgetränks (0.8 g/kg/h) ein isokalorisches Kohlenhydratgetränk ergänzt mit Weizenprotein-Hydrolysat, Leucin und Phenylalanin zugeführt wird. Aber auch die Erhöhung der Kohlenhydratzufuhr auf 1.2 g/kg/h in einem Getränk ohne Leucin und Phenylalanin führt zu einer signifikant höheren Muskelglykogen-Syntheserate [46]. Gemäss Jentjens et al. [14] kann durch Zugabe von Weizenprotein-Hydrolysat sowie Leucin und Phenylalanin zu einem hochkonzentrierten Kohlenhydratgetränk zwar die Insulinantwort erhöht, nicht aber die Glykogen-Syntheserate gesteigert werden. Wenn also Kohlenhydrate in einer hohen Dosis (1.2 g/kg/h) zugeführt werden, scheint die Glykogen-Syntheserate so hoch zu sein, dass sie durch die Zufuhr von Aminosäuren und/oder Proteinen nicht zusätzlich gesteigert werden kann [44]. Da Leucin und Phenylalanin als Signalstoffe die Proteinsynthese in der Muskulatur stimulieren [44,52], kann dennoch davon ausgegangen werden, dass die Regenerationsprozesse nach harten Trainings- und Wettkampfbelastungen durch die Zufuhr von Aminosäuren und Proteinen auch bei sehr hohen Kohlenhydratkonzentrationen günstig beeinflusst werden.

Bei der vorliegenden Untersuchung wurden keine Muskelbiopsien durchgeführt. Deshalb konnte nicht direkt beurteilt werden, ob die aminosäurehaltigen Testgetränke die Glykogensynthese mehr förderten als ein reines Kohlenhydratgetränk. Mittels Blutlaktatmessungen und Bestimmung des RQ kann jedoch indirekt eine Aussage über die Verfügbarkeit des Muskelglykogens gemacht werden [30]. Eine Beeinflussung der Laktatproduktion durch die zugeführten Aminosäuren ist unwahrscheinlich. Varnier et al. [48] haben gezeigt, dass die Laktatproduktion bei submaximalen Belastungen nach einer vorangehenden Infusion von verzweigtkettigen Aminosäuren nicht höher ist, als nach einer Kochsalzinfusion. In der vorliegenden Untersuchung hatte die Supplementation mit den 3 unterschiedlich zusammengesetzten Testgetränken keinen unterschiedlichen Effekt auf die Blutlaktatkonzentration in T2. Die in T2 gegenüber T1 verminderte Laktatkonzentration deutet darauf hin, dass nach der nur 4-h-Regenerationsphase in T2 weniger Glykogen zur Verfügung stand als in T1. Auch der RQ war in T2 nach der Zufuhr der verschiedenen Testgetränke nicht unterschiedlich. Wir gehen deshalb davon aus, dass die Geschwindigkeit, mit der die muskulären Glykogenspeicher in den ersten 4 h nach der Entleerung aufgefüllt wurden, trotz der Zufuhr unterschiedlicher Testgetränke, vergleichbar war. Unsere Resultate bestätigen damit die oben erwähnten Resultate von Van Loon et al. [44,46].

Der RQ wird durch Faktoren wie Trainingszustand, Enzymaktivität, Belastungsintensität, Muskelfaserspektrum, Hormone, Zytokine und Laktatkonzentration im Blut beeinflusst [8,21]. Insbesondere wirkt sich auch der Makronährstoffgehalt einer vorgängig zugeführten Mahlzeit in der Anfangsphase einer Belastung auf den RQ aus [44]. Eine intensive Kohlenhydratzufuhr bewirkt eine Zunahme der Glukose- und Insulinkonzentrationen im Blut, was neben einer Steigerung der Glykolyserate eine Hemmung der Fettsäureoxidation zur Folge hat [4,44]. Dies wird indirekt durch einen Anstieg des RQ sichtbar [21,36,41]. In der vorliegenden Untersuchung war der RQ bei 40%  $P_{max}$  in T1 viel variabler und tiefer als in T2. Die VP haben die Richtlinien zur Testvorbereitung weitgehend befolgt und die Ernährungs- und Trainingsprotokolle seriös geführt. Dennoch waren die Rahmenbedingungen vor T1 weniger einheitlich als vor T2.

### 4.2 Glukoseantwort

Die Glukoseantwort verhielt sich erwartungsgemäss reziprok zur Insulinantwort. Auf die Glukoseantwort wirkten sich die beiden aminosäurehaltigen Testgetränke nicht signifikant unterschiedlich aus. Nur das Testgetränk LP bewirkte eine signifikant tiefere Glukoseantwort als das gewöhnliche Kohlenhydratgetränk.

Grundsätzlich stimmen diese Resultate mit den Erkenntnissen von Van Loon et al. [44] überein. Die schwächere Glukoseantwort bei Zufuhr der gleichen Kohlenhydratmenge weist darauf hin, dass der Zusatz von Leucin und Phenylalanin den Glukosetransport aus dem Blut ins Gewebe beschleunigte. Dieser Effekt wurde durch eine stärkere Insulinausschüttung ermöglicht.

#### 4.3 Subjektives Belastungsempfinden

Die Zusammensetzung der 3 Testgetränke wirkte sich nicht unterschiedlich auf das subjektive Belastungsempfinden in der nachfolgenden Belastung (T2) aus. Hingegen stuften die VP nach Zufuhr der Getränke L und C die Belastung in T2 signifikant härter ein als in T1. Obwohl die Glykogen- und Proteinsynthese durch Aminosäuren beschleunigt wird, nimmt eine vollständige Regeneration mehr als 4 h in Anspruch [29]. Die Regenerationszeit wurde jedoch bewusst kurz gewählt, um Bedingungen zu simulieren, wie sie in Trainings- und Wettkampfsituationen auftreten können [31]. Nach der Regeneration mit Getränk LP wurde die Belastung in T2 subjektiv nicht höher eingestuft als in T1 (Figur 2). Phenylalanin, welches nur im Getränk LP enthalten war, kann die Endorphinbildung im Gehirn stimulieren und damit dämpfend auf Schmerz- und Belastungsempfinden wirken [22,23].

#### 4.4 Einschränkungen

Die Untersuchung wurde mit einer kleinen Anzahl VP durchgeführt. Ursprünglich wurden 7 Athleten rekrutiert. 2 sind aus Gründen, die nicht die Studie betreffen, vorzeitig ausgeschieden. Beim 1. der 3 Testtermine wurde den VP während der 4-h-Regenerationsphase alle 30 min 1 Portion (3.5 ml/kg Körpergewicht) des entsprechenden Testgetränks abgegeben. Weil die VP die vorgesehene Gesamttrinkmenge während der 4-h-Regenerationsphase nicht vollständig konsumieren konnten, wurde diese für die folgenden Testtermine von 8 auf 6 Portionen zu 3.5 ml/kg reduziert. Die letzte Portion wurde dadurch 1 h vor Beginn des Belastungstests T2 eingenommen. Die Messung der Insulin- und Glukosekonzentrationen im Blut erfolgte zu den ursprünglich vorgesehenen Zeitpunkten. Das veränderte Trinkregime hatte also keinen Einfluss auf die Messwerte und dürfte die Leistung im T2 nicht beeinflusst haben.

Es gibt Athleten, bei denen der Geschmack eines Getränks keinen Einfluss auf die Trinkmenge hat [42]. Regenerationsgetränke sollten jedoch durch ihren Geschmack zum Trinken animieren, damit nach einer sportlichen Aktivität möglichst rasch ausreichend Flüssigkeit mit Energie zugeführt wird. Die VP haben vor der Untersuchung noch nie aminosäurehaltige Getränke konsumiert. Um den Geschmack möglichst zu vereinheitlichen, enthielten die Testgetränke Fruchtaromen, künstliche Süsstoffe und Zitronensäure. Trotzdem schmeckten die aminosäurehaltigen Getränke (L und LP) bitter, während das gewöhnliche Kohlenhydratgetränk (C) sehr süß war. Obwohl der bittere Geschmack vor allem von Leucin herrührt, wurde der Geschmack des Getränks L von den VP leicht besser beurteilt als derjenige des Getränks LP. Der unangenehme Geschmack der aminosäurehaltigen Getränke und ein leichtes Aufstossen im Magen haben nicht dazu geführt, dass der Belastungstest T2 nach dem Konsum der aminosäurehaltigen Getränke signifikant früher abgebrochen wurde als nach Einnahme des gewöhnlichen Kohlenhydratgetränks. In nicht publizierten Vorversuchen stellten wir fest, dass eine Reduktion der Aminosäuremenge den Geschmack solcher Getränke verbessert. Viele kommerziell erhältliche Regenerationsgetränke enthalten aus diesem Grund einen deutlich tieferen Aminosäureanteil [34]. Aufgrund der Resultate bei Untersuchungen von Van Loon et al. [44] muss aber bei geringer Aminosäurekonzentration ein positiver Effekt auf die Regeneration in Frage gestellt werden.

Wegen der Schaumbildung müssen aminosäurehaltige Getränke mehrere Stunden vor der Einnahme zubereitet werden. Sportlern, welche ein solches Getränk im Rahmen von Wettkämpfen einnehmen wollen, wird empfohlen, dies zuerst im Training zu erproben. Wie sich aminosäurehaltige Regenerationsgetränke auf die

Insulinantwort und die Leistungsfähigkeit auswirken, wenn sie während einer Belastung eingenommen werden, ist bis heute nicht bekannt. Koba et al. [25] haben jedoch gezeigt, dass der Anstieg der Laktatdehydrogenase (als Marker für Muskelzellschäden) im Blut geringer ausfällt, wenn während eines Dauerlaufs anstelle eines isokalorischen Placebogetränks ein 4%-iges Kohlenhydratgetränk mit einem BCAA-Gehalt von 0.4% zugeführt wird.

Zur Beurteilung der Ausdauerkapazität wurde in der vorliegenden Untersuchung, anstelle eines Zeitfahrtests [44] mit definiertem Ende, ein hochintensiver Test gewählt, bei dem mit einer vorgegebenen Intensität bis zur Erschöpfung gearbeitet werden musste. Das Verfahren stellt hohe Anforderungen an die Motivation der VP, hat aber gegenüber einem Zeitfahrtest den Vorteil, dass schon bei geringen physiologischen Veränderungen Unterschiede erkennbar werden. Die Wahl einer tieferen Belastungsintensität wäre allenfalls realitätsnäher gewesen, hätte aber zu deutlich längeren Belastungszeiten geführt.

Ob die Glykogenspeicher nach dem Entleerungsprotokoll von Keizer et al. [19] auch wirklich leer waren, haben wir nicht biopisch verifiziert. Aufgrund der berechneten Energieumsatzmengen ist jedoch von einer weitgehenden Entleerung auszugehen.

#### 4.5 Gesundheitliche Aspekte

Eine zu hohe Insulinzufuhr kann lebensbedrohende Folgen haben [33]. Die exogene Zufuhr von Insulin ist für Sportlerinnen und Sportler, die an offiziellen Wettkämpfen teilnehmen, seit 1998 verboten. Eine Stimulation der körpereigenen Insulinsekretion durch die Zufuhr von Aminosäuren ist erlaubt; Nebenwirkungen sind bis heute nicht bekannt. Nach dem Konsum von aminosäurehaltigen Getränken steigt die Insulinkonzentration an, was die Erholungsprozesse günstig beeinflusst. Eine erhöhte Insulinkonzentration kann das Risiko für Atherosklerose erhöhen [33]. Regelmäßige körperliche Aktivität hat jedoch eine präventive Wirkung [48], sodass Leistungssportlerinnen und -sportler nicht auf eine Stimulation der Insulinausschüttung im erwähnten Kontext verzichten müssen.

Eine massive Protein- oder Aminosäurezufuhr kann gastrointestinale Probleme wie Blähungen und Durchfall verursachen [33,52]. Bei inadäquater Dosierung und Anwendung von Proteinen können negative Effekte auf die Leistung und die Belastbarkeit sowie gesundheitliche Nebenwirkungen nicht ausgeschlossen werden [48]. Beim Abbau von Aminosäuren entsteht Ammoniak. Werden vermehrt Proteine und Aminosäuren zugeführt, fällt folglich auch mehr Ammoniak an. Damit dieses über die Nieren ausgeschieden werden kann, muss es unter hohem Energieaufwand zu wasserlöslichem Harnstoff metabolisiert werden. Harnstoff bindet viel Wasser und entzieht dieses dem Körper, sodass es bei einer Proteinzufuhr von mehr als ca. 2 g/kg/Tag zu erhöhten Flüssigkeitsverlusten kommt. Die in der vorliegenden Arbeit zur Intensivierung der Insulinsekretion eingesetzten Proteinmengen liegen weit unter 2 g/kg/Tag. Wenn einzelne Aminosäuren im Überfluss zugeführt werden, kann die Resorption anderer Aminosäuren blockiert werden [51], sodass eine Aminosäuren-Dysbalance entsteht [10,42].

Menschen mit Phenylketonurie oder Leucinoase (Ahornsirupkrankheit) sollten ihren Organismus nicht durch die Zufuhr von Getränken mit Phenylalanin respektive Leucin belasten [17].

## 5. Schlussfolgerungen

Regenerationsgetränke, welche zusätzlich zu Kohlenhydraten Weizenprotein-Hydrolysat sowie die Aminosäuren Leucin und Phenylalanin in genügend hoher Konzentration enthalten, stimulieren die Insulinausschüttung stärker als gewöhnliche Kohlenhydratgetränke. Verschiedene Hinweise deuten auf eine leichte Beschleunigung der Regenerationsprozesse hin. Dazu kommt, dass Phenylalanin bei hochintensiven Belastungen das subjektive Anstrengungsempfinden günstig beeinflussen kann. Aminosäurehaltige Regenerationsgetränke können bis 1 h vor Beginn einer hochintensiven Belastung auf dem Fahrrad eingenommen werden, ohne dass sich

negative Effekte auf das Dauerleistungsvermögen bemerkbar machen. Der Geschmack der aminosäurehaltigen Getränke ist gewöhnungsbedürftig. Ausdauersportler, welche ihn tolerieren, können von solchen Getränken leichte Vorteile erwarten.

## 6. Danksagungen

Die Studie wurde von Wander AG, Neuenegg, Schweiz; Swiss-Ski und Swiss Olympic unterstützt. Wir danken den Athleten für ihren Einsatz.

### Korrespondenzadresse:

PD Dr. Michael Vogt, Universität Bern, Institut für Anatomie, Baltzerstrasse 2, CH-3000 Bern 9, vogt@ana.unibe.ch, Tel. +41 31 631 84 68, Fax +41 31 631 38 07.

## 7. Literatur

- 1 Betts J., Williams C., Duffy K., Gunner F. (2007): The influence of carbohydrate and protein ingestion during recovery from prolonged exercise on subsequent endurance performance. *J. Sports Sci.* 25: 1949–1960.
- 2 Borg G. (1973): Perceived exertion: a note on history and methods. *Med. Sci. Sports Exerc.* 5: 90–93.
- 3 Borg G. (1982): Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 14: 377–381.
- 4 Christensen E.H., Hausen O. (1939): Arbeitsfähigkeit und Ernährung. *Acta. Physiol. Scand.* 81: 160–171.
- 5 Décombaz J. (2003): Ernährung und der Wiederaufbau von Energiespeichern im Muskel nach einer physischen Aktivität. *Schweiz. Z. Sportmed. Sporttraumatol.* 51: 31–38.
- 6 Faria E.W., Parker D.L., Faria I.E. (2005): The science of cycling. Factors affecting performance – Part 2. *Sports Med.* 35: 313–337.
- 7 Garlick P.J. (2005): The role of leucine in the regulation of protein metabolism. *J. Nutr.* 135: 1553–1556.
- 8 Goedecke J.H., St Clair Gibson A., Grobler L., Collins M., Noakes T.D., Lambert E.V. (2000): Determinants of the variability in respiratory exchange ratio at rest and during exercise in trained athletes. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 279: E1325–E1334.
- 9 Gressmann M. (2003): *Fahrradphysik und Biomechanik*. Moby Dick Verlag, Kiel.
- 10 Grundy S.M., Balady G.J., Criqui M.H., Fletcher G., Greenland P., Hiratzka L.F., Houston-Miller N., Kris-Etherton P., Krumholz H.M., LaRosa J., Ockene I.S., Pearson T.A., Reed J., Washington R., Smith S.C.Jr. (1997): Guide to primary prevention of cardiovascular diseases. A statement for healthcare professionals from the Task Force on Risk Reduction. *Circulation* 95: 2329–2331.
- 11 Hargreaves M. (1997): Interactions between muscle glycogen and blood glucose during exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 25: 21–39.
- 12 Hultman E.H. (1986): Carbohydrate metabolism during hard exercise and in the recovery period after exercise. *Acta. Physiol. Scand.* 128: 75–82.
- 13 Ivy J.L., Goforth H.W.Jr., Damon B.M., McCauley T.R., Parsons, E.C., Price, T.B. (2002): Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *J. Appl. Physiol.* 93: 1337–1344.
- 14 Jentjens R.L., van Loon L.J., Mann C.H., Wagenmakers A.J., Jeukendrup A.E. (2001): Addition of protein and amino acids to carbohydrates does not enhance postexercise muscle glycogen synthesis. *J. Appl. Physiol.* 91: 839–846.
- 15 Jeukendrup A.E. (2003): Kohlenhydratreiche versus fettreiche Ernährungsweisen im Ausdauersport. *Schweiz. Z. Sportmed. Sporttraumatol.* 51: 17–23.
- 16 Kaastra B., Manders R.J., van Breda E., Kies A., Jeukendrup A.E., Keizer H.A., Kuipers H., van Loon L.J. (2006): Effects of increasing insulin secretion on acute postexercise blood glucose disposal. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38: 268–275.
- 17 Kasper H. (2000): *Ernährungsmedizin und Diätetik*. Urban & Fischer Verlag, 9. Aufl., München.
- 18 Katsanos C.S., Kobayashi H., Sheffield-Moore M., Aarsland A., Wolfe R.R. (2006): A high proportion of leucine is required for optimal stimulation of the rate of muscle protein synthesis by essential amino acids in elderly. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 291: E381–E387.
- 19 Keizer H.A., Kuipers H., van Kranenburg G., Geurten P. (1987): Influence of liquid and solid meals on muscle glycogen resynthesis, plasma fuel hormone response and maximal physical working capacity. *Int. J. Sports Med.* 8: 99–104.
- 20 Kimber N.E., Ross J.J., Mason S.L., Speedy D.M. (2002): Energy balance during an ironman triathlon in male and female triathletes. *Int. J. Sports Nutr. Exerc. Metab.* 12: 47–62.
- 21 Kirsch K. (2000): Leistungsphysiologie. In: Klinker R., Silberagl S. (Hrs.), *Lehrbuch der Physiologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 509–529.
- 22 Kitade T., Odahara Y., Shinohara S., Ikeuchi T., Sakai T., Morikawa K., Minamikawa M., Toyota S., Kawachi A., Hyodo M. (1988): Studies on the enhanced effect of acupuncture analgesia and acupuncture anesthesia by D-phenylalanine (first report) – effect on pain threshold an inhibition by naloxone. *Acupunct. Electrother. Res.* 13: 87–97.
- 23 Kitade T., Odahara Y., Shinohara S., Ikeuchi T., Sakai T., Morikawa K., Minamikawa M., Toyota S., Kawachi A., Hyodo M. (1990): Studies on the enhanced effect of acupuncture analgesia and acupuncture anesthesia by D-phenylalanine (2nd report) – schedule of administration and clinical effects in low back pain an thooth extraction. *Acupunct. Electrother. Res.* 15: 121–135.
- 24 Knechtle B., Boutellier U. (2000): Nutrition in long physical endurance events. *Praxis* 89: 2051–2062.
- 25 Koba T., Hamada K., Sakurai M., Matsumoto K., Hayase H., Imaizumi K., Tsujimoto H., Mitsuzono R. (2007): Branched-chain aminoacids supplementation attenuates the accumulation of blood lactate dehydrogenase during distance running. *J. Sports Med. Phys. Fit.* 47: 316–322.
- 26 Koopman R., Verdijk L.B., Beelen M., Gorselink M., Kruseman A.N., Wagenmakers A.J., Kuipers H., van Loon L.J. (2007): Co-ingestion of leucine with protein does not further augment post-exercise muscle protein synthesis rates in elderly men. *Br. J. Nutr.* 13: 1–10.
- 27 Koopman R., Wagenmakers A.J., Manders R.J., Zorenc A.H., Senden J.M., Gorselink M., Keizer H.A., van Loon L.J. (2005): Combined ingestion of protein and free leucine with carbohydrate increases postexercise muscle protein synthesis in vivo in male subjects. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 288: E645–E653.
- 28 Layman D.K. (2002): Role of leucine in protein metabolism during exercise and recovery. *Can. J. Appl. Physiol.* 27: 646–663.
- 29 Lynch C.J., Patson B.J., Anthony J., Vaval A., Jefferson L.S., Vary T.C. (2002): Leucine as a direct-acting nutrient signal that regulates protein synthesis in adipose tissue. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 283: E503–E513.
- 30 Maassen N., Busse M.W. (1989): The relationship between lactic acid and work load: a measure for endurance capacity or an indicator of carbohydrate deficiency? *Eur. J. Appl. Physiol.* 58: 728–737.
- 31 Maassen N., Schneider G., Caspers A., Busse M.W. (1992): Dauerleistungsfähigkeit und Laktatleistungskurve bei Ausdauertrainierten und Untrainierten nach Glykogenbelastung. *Dtsch. Z. Sportmed.* 43: 511–520.
- 32 Mannhart C., Colombani P. (2001): Grundlagen der Sporternährung – die elementare Bedeutung der Energie-, Makronährstoff- und Flüssigkeitszufuhr. *Schweiz. Z. Sportmed. Sporttraumatol.* 49: 125–130.
- 33 Manninen A.H. (2006): Hyperinsulinaemia, hyperaminoacidaemia and post-exercise muscle anabolism: the search for the optimal recovery drink. *Br. J. Sports. Med.* 40: 900–905.
- 34 McNurlan M.A., Fern E.N., Garlick P.J. (1982): Failure of leucine to stimulate protein synthesis in vivo. *Biochem. J.* 204: 831–838.
- 35 Norton L.E., Layman D.K. (2006). Leucine regulates translation initiation of protein synthesis in skeletal muscle after exercise. *J. Nutr.* 136: 533–537.
- 36 Okano G., Sato Y., Takumi Y., Sugawara M. (1996): Effect of 4h pre-exercise high carbohydrate and high fat meal ingestion on endurance performance and metabolism. *Int. J. Sports Med.* 17: 530–534.
- 37 O’Sullivan, S.B. (1983): Perceived exertion – A review. *Phys. Ther.* 64: 343–346.
- 38 Price T.B., Laurent D., Petersen K.F., Rothman D.L., Shulman G.I. (2000): Glycogen loading alters muscle glycogen resynthesis after exercise. *J. Appl. Physiol.* 88: 698–704.
- 39 Richter E.A., Derave W., Wojtaszewski J.F. (2001): Glucose, exercise and insulin: emerging concepts. *J. Physiol. (Lond.)* 535: 313–322.
- 40 Rieu I., Balage M., Sornet C., Giraudet C., Pujos E., Grizard J., Mosoni L., Dardevet D. (2006): Leucine supplementation improves muscle pro-

- tein synthesis in elderly men independently of hyperaminoacidaemia. *J. Physiol. (Lond.)* 575: 305–315.
- 41 Schütz G., Hoppeler H., Billeter R., Brouns F. (1991): Glykogengehalt und Muskelzellschaden bei negativer Arbeit. Dissertation, Universität Bern.
- 42 Shirreffs SM (2003): Das optimale Sportgetränk. *Schweiz. Z. Sportmed. Sporttraumatol.* 51: 25–29.
- 43 Shulman R.G., Rothman D.L. (2000): The 'glycogen shunt' in exercising muscle: A role for glycogen in muscle energetics and fatigue. *Proc. Natl. Sci. USA* 98: 457–461.
- 44 Van Loon L.J. (2001): The effects of exercise and nutrition on muscle fuel selection. Dissertation, Universität Maastricht.
- 45 Van Loon L.J., Kruijshoop M., Verhagen H., Saris W.H., Wagenmakers A.J. (2000): Ingestion of protein hydrolysate and amino acid – carbohydrate mixtures increases postexercise plasma insulin responses in men. *J. Nutr.* 130: 2508–2513.
- 46 Van Loon L.J., Saris W.H., Kruijshoop M., Wagenmakers A.J. (2000): Maximizing postexercise muscle glycogen synthesis: carbohydrate supplementation and the application of amino acid or protein hydrolysate mixtures. *Am. J. Clin. Nutr.* 72: 106–111.
- 47 Van Loon L.J., Saris W.H., Verhagen H., Wagenmakers A.J. (2000): Plasma insulin responses following the ingestion of different amino acid and/or protein mixtures with carbohydrate. *Am. J. Clin. Nutr.* 72: 96–105.
- 48 Varnier M., Sarto P., Martines D., Lora L., Carmignoto F., Leese G.P., Naccarato R. (1994): Effect of infusing branched-chain amino acid during incremental exercise with reduced muscle glycogen content. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 26–31.
- 49 Walton P., Rhodes E.C. (1997): Glycaemic index and optimal performance. *Sports Med.* 23: 164–172.
- 50 Williams M.B., Raven P.B., Fogt D.L., Ivy J.L. (2003): Effects of recovery beverages on glycogen restoration and endurance exercise performance. *J. Strength Cond. Res.* 17: 12–19.
- 51 Williams M.H. (1997). *Ernährung, Fitness und Sport*. Ullstein Mosby Verlag, Berlin.
- 52 Wolfe R.R. (2000): Protein supplements and exercise. *Am. J. Clin. Nutr.* 72: 551–557.
- 53 Zawadzki K.M., Yaspelkis B.B., Ivy J.L. (1992): Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J. Appl. Physiol.* 72: 1854–1859.