Universitätsklinikum Ulm, Klinik für Innere Medizin II
Sektion Sport- und Rehabilitationsmedizin
Ärztlicher Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Jürgen M. Steinacker

# Vergleich ergogener Effekte und gastrointestinaler Toleranz zwischen semisolider und flüssiger Ernährungsstrategie im Langstrecken-Triathlon

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin der Medizinischen Fakultät
der Universität Ulm

vorgelegt von
David Nikolai Zügel
geboren in Mainz
2016

Amtierender Dekan: Prof. Dr. Thomas Wirth

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Dr. h.c. Jürgen M. Steinacker
2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. Ralph G. Luthardt

Tag der Promotion: 27.04.2017

Teile dieser Dissertation wurden bereits in folgendem Fachartikel veröffentlicht:

Sareban, M., Zugel, D., Koehler, K., Hartveg, P., Zugel, M., Schumann, U., Steinacker, J. M. and Treff, G. (2016). "Carbohydrate Intake in Form of Gel Is Associated With Increased Gastrointestinal Distress but Not With Performance Differences Compared With Liquid Carbohydrate Ingestion During Simulated Long-Distance Triathlon." Int J Sport Nutr Exerc Metab **26**: 114-122.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis ..... III

**1 Einleitung** ..... 1

1.1 Hypothesen ..... 5

1.2 Fragestellungen ..... 6

**2 Material und Methoden** ..... 7

2.1 Studiendesign ..... 7

2.2 Probanden ..... 8

2.3 Vorbereitende Untersuchungen ..... 9

2.4 Vortestbedingungen ..... 9

2.5 Untersuchungsablauf ..... 10

2.6 Kohlenhydratzufuhr ..... 10

2.7 Datenakquise ..... 12

2.8 Ergometrie ..... 13

2.8.1 Fahrrad-Ergometrie ..... 13

2.8.2 Laufband-Ergometrie ..... 13

2.8.3 Sonstige Messgeräte ..... 13

2.9 Metabolische Parameter ..... 14

2.9.1 Douglas Bag-Methode ..... 14

2.9.2 Bestimmung von Laktat und Blutglukose ..... 14

2.9.3 Sonstige Messgrößen ..... 15

2.10 Statistische Auswertung ..... 17

2.10.1 Vorschalttest zum Ausschluss von relevanten Periodeneffekten ..... 18

2.10.2 Konfirmatorischer Test auf Unterschiedlichkeit der Behandlungseffekte ..... 18

**3 Ergebnisse** ..... 19

3.1 Ernährung vor den Untersuchungen ..... 19

3.2 Schwimm- und Radleistung ..... 20

3.3 Laufleistung ..... 20

3.4 Flüssigkeits- und Kohlenhydratzufuhr während der Untersuchungen ..... 20

3.5 Blutzucker- und Laktatverlauf ..... 21

3.6 Verlauf des respiratorischen Quotienten ..... 23

3.7 Subjektives Belastungsempfinden ..... 24

3.8 Gastrointestinale Symptome ..... 25

3.9 Kostenvergleich ..... 25

**4 Diskussion** ..... 26

4.1 Leistungsfähigkeit ..... 26

4.2 Metabolische Parameter ..... 27

4.3 Hydratation ..... 27

4.4 Gastrointestinale Toleranz ..... 28

4.5 Wirtschaftliche Faktoren ..... 29

4.6 Nahrungsergänzungsmittel und Doping ..... 29

4.7 Limitationen ..... 30

**5 Zusammenfassung** ..... 31

**6 Literaturverzeichnis** ..... 32

Danksagung ..... 35

Lebenslauf ..... 36

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| **ADP** | Adenosindiphosphat |
| **ATP** | Adenosintriphosphat |
| **cm** | Zentimeter |
| **$CO_2$** | Kohlenstoffdioxid |
| **d** | Tag |
| **€** | Euro |
| **$FECO_2$** | Exspiratorischer Kohlenstoffdioxidgehalt |
| **$FEO_2$** | Exspiratorischer Sauerstoffgehalt |
| **GEL** | Semisolide Ernährungsstrategie |
| **GI** | Gastrointestinal |
| **GLUT2** | Basolateraler Monosacharidtransporter |
| **GLUT5** | Luminaler Fruktosetransporter |
| **h** | Stunde |
| **$H_2O$** | Wasser |
| **$K^+$** | Kaliumionen |
| **kcal** | Kilokalorien |
| **kg** | Kilogramm |
| **KG** | Körpergewicht |
| **KH** | Kohlenhydrate |
| **kJ** | Kilojoule |
| **km** | Kilometer |
| **l** | Liter |
| **LIQ** | Flüssige Ernährungsstrategie |
| **min** | Minuten |
| **ml** | Milliliter |
| **mmol** | Millimolar |
| **n** | Anzahl |
| **$Na^+$** | Natriumionen |
| **$O_2$** | Sauerstoff |

| | |
|---|---|
| **RPE** | Subjektives Belastungsempfinden (*rated of perceived exertion*) |
| **RQ** | Respiratorischer Quotient |
| **S** | Summe |
| **s** | Sekunden |
| **SELIN** | *Semisolid versus Liquid Nutrition* |
| **SGLT1** | Luminaler Natrium/Glucose-Co-Transporter 1 |
| **SPSS** | *Statistical Package of the Social Sciences* |
| **$VO_{2max}$** | Maximale Sauerstoffaufnahme |
| **VT** | Ventilatorische Schwelle |
| **W** | Watt |

# 1 Einleitung

Die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Menschen wird durch multiple physiologische sowie psychologische Faktoren determiniert (Abb.1). Dazu zählen genetische Veranlagungen mit einer sportartspezifisch begünstigenden Biomechanik und Skelettmuskelfasertyp-Zusammensetzung einschließlich anthropometrischer Qualitäten mit einer gut ausgebildeten neuromuskulären Ansteuerung und Kapillardichte der Muskulatur (Anderson 1996; Lane, Devonport et al. 2016; Sarzynski, Ghosh et al. 2016). Das Herzkreislaufsystem bestimmt den Transport, der zur Energiegewinnung notwendigen Stoffe, wie Fettsäuren, Glukose und $O_2$ sowie den Abtransport metabolischer Zwischen- und Endprodukte, wie $CO_2$ und Laktat und ist somit maßgebend an der Ausdauerleistungsfähigkeit beteiligt (Hausswirth and Lehenaff 2001). Zunehmend an Bedeutung als Einflussfaktor der Ausdauerleistungsfähigkeit hat in den letzten Jahren das Ernährungsverhalten gewonnen (Jeukendrup 2011).

Seit den 1970er Jahren ist wissenschaftlich belegt, dass bereits nach einer Stunde moderat bis hochintensiver Ausdauerbelastung der Glukosegehalt im Blut bzw. der Glykogengehalt im Muskel bei fehlender exogener Glukosezufuhr deutlich abnimmt (Gollnick, Piehl et al. 1974; Jeukendrup 2011). Die Folge ist ein Leistungsverlust bzw. Abbruch der Belastung, da der arbeitenden Muskulatur nicht ausreichend Substrat für die Energiebereitstellung zur Verfügung steht. Um solch einen Leistungsverlust zu vermeiden, ist der Körper auf Zufuhr exogener Kohlenhydrate (KH) angewiesen (Coggan and Coyle 1991; Jeukendrup 2011; Temesi, Johnson et al. 2011). Dadurch kann ein Abfall des Blutzuckerspiegels vermieden (Ahlborg and Felig 1976), die Oxidationsrate von KH auf einem hohen Niveau gehalten (Jentjens, Moseley et al. 2004) und der Abbau von Glykogen hinausgezögert werden (Bjorkman, Sahlin et al. 1984; Coyle, Coggan et al. 1986; De Bock, Derave et al. 2007). Die Bedeutung der exogenen KH steigert sich mit Zunahme der Belastungsdauer (Jeukendrup 2011) und ist somit bei Ausdauersportarten wie Triathlon von großer Bedeutung und deren Konsum bei Ausdauerwettkämpfen üblich.

Triathlon ist eine Mehrkampf-Ausdauersportart bestehend aus den Disziplinen Schwimmen, Radfahren und Laufen. Dabei werden die Disziplinen stets in gleicher Reihenfolge absolviert, können sich jedoch in den Distanzen und konsekutiv in der

Wettkampfdauer deutlich unterscheiden. Bereits im Rahmen einer Kurz- oder Olympischen Distanz beträgt die Wettkampfdauer für leistungsorientierte Sportler knapp zwei Stunden. Im Breitensport erfahren die längeren Distanzen eine zunehmende Beliebtheit. Die klassischen Langstrecken-Triathlon Wettbewerbe werden als Half-Ironman (1,9 km Schwimmen, 90 km Radfahren, 21,1 km Laufen) und Ironman (3,8 km Schwimmen, 180 km Radfahren, 42,2 km Laufen) bezeichnet. Eine Wettkampfdauer von 4-7 Stunden, respektive 8-17 Stunden kommen dabei regelmäßig vor (Sareban, Zugel et al. 2016). Die Weltbestzeit für eine Ironman-Distanz, aufgestellt in Roth im Jahr 2010 von dem deutschen Langstrecken-Triathleten Andreas Realert, liegt bei 7:41:33 Stunden - eine herausragende Ausdauerleistung bei der die oben genannten und in Abbildung 1 skizzierten Faktoren optimal trainiert sein müssen (Anderson 1996; Broad and Rye 2015; Hausswirth and Lehenaff 2001; Sarzynski, Ghosh et al. 2016; Stellingwerff and Jeukendrup 2011).

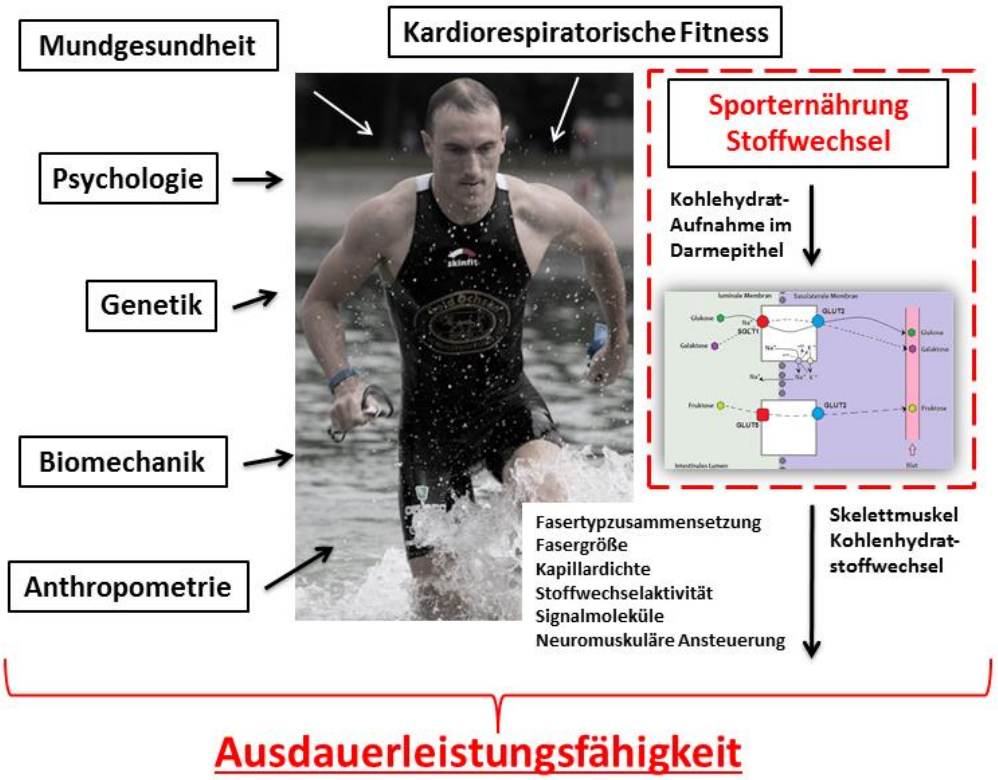


**Abb.1: Determinanten der humanen Ausdauerleistungsfähigkeit. Der rot gestrichelte Bereich beinhaltet die Thematik der vorliegenden Studie, in welcher der Einfluss unterschiedlicher Kohlenhydratträger auf die Ausdauerleistungsfähigkeit in einem unter Laborbedingungen simulierten Langstrecken-Triathlon untersucht wurde (Ulm 2013). Das anteilig graue und violette Schaubild verweist auf den Mechanismus der unterschiedlichen Kohlenhydrataufnahme im Darmepithel (Jeukendrup 2013).**

Unterschiedliche Arbeitsgruppen im Bereich der Leistungsphysiologie beschäftigen sich aktuell mit der Frage nach den notwendigen physiologischen Voraussetzungen des Athleten, der als erster die Marathonschallmauer von zwei Stunden unterbietet (Stellingwerff and Jeukendrup 2011). Dabei scheint die maximal mögliche KH Aufnahme im Darmepithel und die KH Oxidation in der arbeitenden Muskulatur eine zentrale Rolle zu spielen (Abb.1).

Neue wissenschaftliche Erkenntnisse sorgten in den letzten Jahren für Änderungen in der Zusammensetzung und Menge der exogenen KH. 2009 wurde zuletzt in einer Gemeinschaftsarbeit mehrerer internationaler Organisationen während Ausdauerbelastungen mit einer Dauer von mehr als einer Stunde die exogene Zufuhr von 0,7 g KH · $kg^{-1}$ Körpergewicht · $h^{-1}$ entsprechend etwa 30-60 Gramm pro Stunde empfohlen (Rodriguez, Di Marco et al. 2009). Rezentere Studien zeigten eine weitere Verbesserung der Leistungsfähigkeit bei einer Zufuhr von bis zu 81 g KH pro Stunde (Jeukendrup 2011; Smith, Pascoe et al. 2013) bzw. in der Kombination von Glukose (in Form des Glukose-Polymers Maltodextrin) und Fruktose im Verhältnis 2:1 (Currell and Jeukendrup 2008). Jentjens et al. zeigten erstmals 2004, dass die exogene Gabe einer flüssigen Lösung aus Glukose und Fruktose im Verhältnis 2:1 (1,2 g/min Glukose, 0,6 g/min Fruktose) im Vergleich zu einer reinen Glukoselösung (1,8 g/min Glukose) während einer 3-stündigen Radbelastung zu einer um 55% höheren maximalen KH Oxidationsrate führte (1,26 g/min Glukose/Fruktose vs. 0,8 g/min nur Glukose) (Jentjens, Moseley et al. 2004). Mechanistisch ist dies dadurch zu begründen, dass die verschiedenen KH unterschiedliche Transportwege im Darmepithel nutzen. Während Glukose und Galaktose mittels des Natrium/Glukose-Co-Transporters 1 (SGLT1) in das Darmepithel transportiert werden, wird Fruktose mittels des Fruktose Transporters (GLUT5) per erleichterte Diffusion (passiver Transport) in die Zelle geschleust (Jeukendrup 2013; Jeukendrup and Gleeson 2010) (Abb.2).

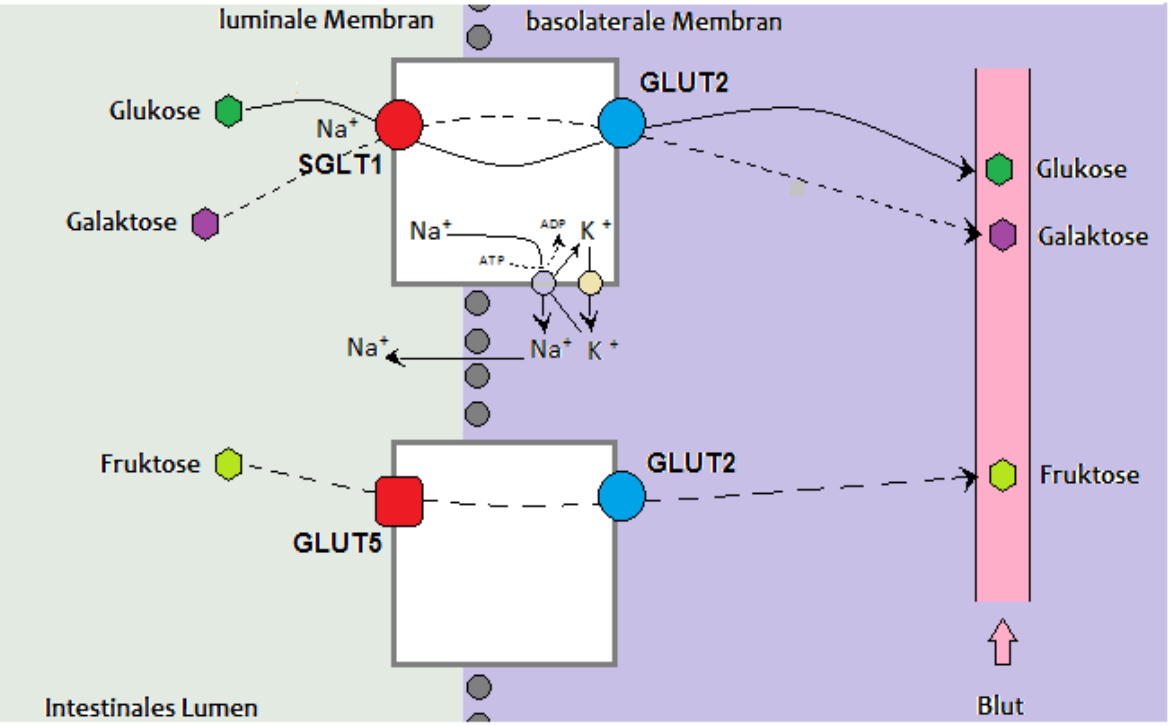


**Abb.2: Glukose (grün) und Galaktose (violett) gelangen bei der Verdauung unter Freisetzung von Adenosintriphophat (ATP) aus dem intestinalen Lumen (grau) über den Natrium/Glucose-Co-Transporters 1 (SGLT1, roter Kreis) in das Darmepithel und werden über den basolateralen Monosaccharidtransporter (GLUT2, blauer Kreis) in den Blutkreislauf (rosa) gelassen. Fruktose (hellgrün) wird mittels des luminalen Fruktosetransporters (GLUT5, rotes Quadrat) anhand erleichterter Diffusion (passiver Transport) in die Zelle geschleust um über den basolateralen GLUT2-Transporter (blauer Kreis) in den Blutkreislauf zu gelangen (Graphik erstellt nach Jeukendrup 2013).**

Die aktuellen Empfehlungen für den Konsum von KH während Ausdauerbelastungen basieren jedoch auf Studien, die für Untersuchungen KH nur in flüssiger Form benutzten (Smith, Pascoe et al. 2013). In der für die aktuellen Empfehlungen maßgebenden Studie von Smith et al. aus dem Jahr 2013 wurden kombinierte KH (Glukose, Fruktose und Maltodextrin im Verhältnis 1:1:1) mit einer Gesamtmenge aufsteigend von 10 – 120 g KH pro Stunde in einem Liter Wasser gelöst und dann die Leistungsfähigkeit am Fahrradergometer getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass bei 78 g KH pro Stunde die beste Leistungsfähigkeit resultiert.

Daten aus dem Radsport (Havemann and Goedecke 2008) und eigene Erfahrungen aus dem Langstrecken-Triathlon zeigen, dass unter Athleten die semisolide hochkonzentrierte KH-Zufuhr in Gel-Form bevorzugt wird. Gründe dafür sind das kleine Packmaß sowie eine garantierte Energiezufuhr unabhängig vom individuellen Flüssigkeitsbedarf des Sportlers. Der Zusatz von gel-bildenden Fasern führte in einigen Studien jedoch zu einer Reduktion der Magenentleerung und vermehrt zu

gastrointestinalen (GI) Beschwerden (Meyer, Gu et al. 1988). Verantwortlich dafür können sowohl unverdauliche Polysaccharide wie Zellulose als auch verdauliche Mehrfachzucker wie bspw. Stärke sein. Das in der Studie angewandte Gel, ist auf der Kölner Liste® zu finden, dies schließt jedoch nur aus, dass die Präparate mit dopingrelevanten Substanzen verunreinigt sind. Die exakte Zusammensetzung der kommerziell erhältlichen Gele wird dem Sportler in der Regel nur mangelhaft transparent zugänglich gemacht.

Wenige Studien haben den Einfluss unterschiedlicher Kohlenhydratträger auf die körperliche Leistungsfähigkeit bei Ausdauerbelastungen untersucht und die existierenden Daten haben nur eingeschränkte Aussagekraft für den Triathlonsport mit einigen Limitationen. So wurden die Studien nur auf dem Fahrradergometer (Campbell, Prince et al. 2008) oder nur für den Laufsport (Burke, Wood et al. 2005) mit zu geringer Intensität und zu kurzer Belastungsdauer (Burke, Wood et al. 2005; Campbell, Prince et al. 2008) durchgeführt. Es wurden weder die aktuellen Empfehlungen für die KH-Konzentration noch deren Zusammensetzung (Jeukendrup 2011) umgesetzt oder es wurde eine spezielle Diät befolgt, die für Triathleten vor einem Wettkampf ungeeignet ist (Pfeiffer, Cotterill et al. 2009).

Anhand der aktuellen Studienlage konnte somit keine sichere Aussage für die wachsende Langstrecken-Triathlon Gemeinschaft getroffen werden, ob nun flüssige oder gel-förmige Energieträger die bessere Ernährungsstrategie in einem Triathlon Wettkampf darstellen. Deshalb wurden in der vorliegenden Arbeit folgende Hypothesen und Fragestellungen in einem unter Laborbedingungen durchgeführten Langstrecken-Triathlon gezielt untersucht:

## 1.1 Hypothesen

- **i.** Die semisolide Ernährungsstrategie (GEL) hat gegenüber einer flüssigen Ernährungsstrategie (LIQ) keinen unterschiedlichen Einfluss auf die zurückgelegte Distanz eines abschließenden Laufs auf Zeit in einem simulierten Langstrecken-Triathlon.
- **ii.** Blutglukose, Laktat und der respiratorische Quotient (RQ) zeigen bei GEL und LIQ keinen Unterschied im Verlauf.
- **iii.** LIQ ist gegenüber GEL gastrointestinal (GI) verträglicher.

## 1.2 Fragestellungen

**i.** Zeigt GEL gegenüber LIQ in einem abschließenden Lauf auf Zeit einen unterschiedlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit?

**ii.** Welche Auswirkungen haben die Ernährungsstrategien GEL und LIQ auf den RQ sowie auf metabolische Parameter wie den Blutglukose- und Laktatverlauf?

**iii.** Beeinträchtigt GEL die GI Toleranz?

In dieser Arbeit wurde eine rein semisolide Ernährung in Gelform (GEL) einer isokalorisch in Wasser gelösten Kohlenhydratmischung (LIQ) im Rahmen eines simulierten Langstrecken-Triathlons gegenübergestellt. Primärer Endpunkt ist die zurückgelegte Distanz im abschließenden Lauf auf Zeit. Sekundäre Endpunkte sind die im Versuch erhobenen metabolischen und ventilatorischen Parameter (RQ) sowie Fragen nach GI-Beschwerden (Sareban, Zugel et al. 2016).

# 2 Material und Methoden

## 2.1 Studiendesign

Bei der Studie handelt es sich um eine randomisierte Crossover-Studie. Jeder Teilnehmer absolvierte unter Laborbedingungen zwei simulierte Langdistanz-Triathlon Untersuchungen (Abb.3). Bei einer Untersuchung wurden die KH als GEL oral verabreicht; in der gegenübergestellten in Form von LIQ. Der englische Titel verlieh der Studie das Akronym **SELIN** (***Se****misolid versus* ***Li****quid* ***N****utrition*).

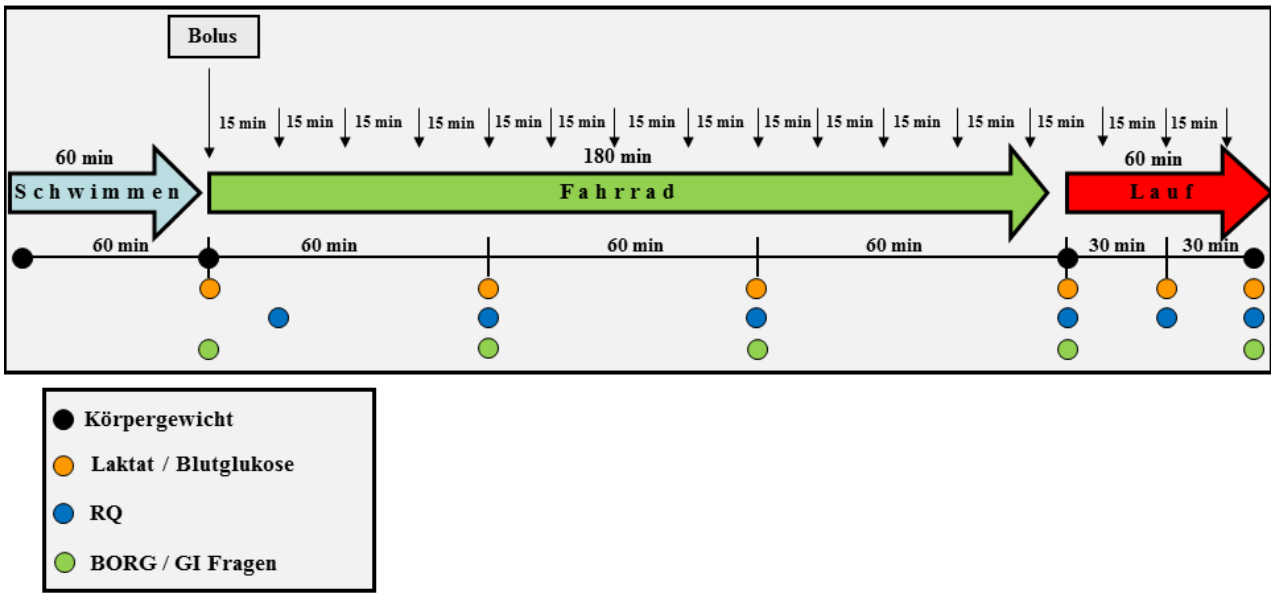


**Abb.3: Untersuchungsablauf zusammengesetzt aus einer 60 min Schwimmbelastung (Intensität 90 % der persönlichen 400 m Bestzeit), 180 min Radfahren (Intensität 90 % VT 1) und einem abschließenden 60 min Maximallauf. An definierten Zeitpunkten werden Körpergewicht, Laktat/Blutglukose, RQ, BORG/GI Frage der Langstrecken-Triathleten erfasst. Die Nahrungsaufnahme beginnt mit dem ersten Bolus nach 60 min, dann alle 15 min (Ulm 2013). VT 1 = erste ventilatorische Schwelle; RQ = respiratorischer Quotient; BORG = subjektives Belastungsempfinden; GI = gastrointestinal.** Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060. © Human Kinetics, Inc.

Die zurückgelegte Distanz beim Laufen diente als primärer Surrogatendpunkt für die Leistungsfähigkeit. Die im Verlauf erhobenen metabolischen und ventilatorischen Parameter sowie Fragen nach GI-Beschwerden dienten als sekundäre Surrogatendpunkte für die KH-Resorption und Oxidation sowie für die GI-Verträglichkeit. Für die Schwimm- bzw. Fahrradbelastung wurde ein rein zeit-basierter Ansatz gegenüber einem klassischen leistungs-basierten Ansatz gewählt. Hintergrund der Entscheidung war, dass eine inadäquate Tempogestaltung während der Schwimm- bzw. Radbelastung einen

unterschiedlichen Einfluss auf die Laufleistung haben könnte. Um einen Einfluss des Biorhythmus auf die Leistungsfähigkeit zu vermeiden, wurden die entsprechenden Versuche eines jeden Teilnehmers zur gleichen Tageszeit durchgeführt (Sareban, Zugel et al. 2016).

## 2.2 Probanden

Zehn männliche Triathleten nahmen freiwillig an dieser Studie teil. Einschlusskriterium war mindestens ein erfolgreich beendeter Langstrecken-Triathlon, Lebensalter > 20 Jahre und eine $VO_{2max}$ > 50 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$. Alle Probanden befanden sich in der Vorbereitungsphase (Februar 2013) auf die Wettkampfsaison. Tabelle 1 dokumentiert im arithmetischen Mittel ± Standardabweichung die anthropometrischen Daten der Studienteilnehmer. Alter, Körpergröße, Körpergewicht, Körperfettanteil, die maximale Sauerstoffaufnahme ($VO_{2max}$), maximale Leistung am Radergometer ($W_{max}$) und Leistung an der ersten ventilatorischen Schwelle (VT1) sowie die Schweißrate bei 90 % der VT 1 werden in Tabelle 1 dargestellt (Sareban, Zugel et al. 2016).

**Tab.1: Anthropometrische Daten der Teilnehmer (Ulm 2013).** Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060. © Human Kinetics, Inc.

| Variablen | Männer (n = 9) |
|---|---|
| Alter (Jahre) | 38,6 ± 10,7 |
| Körpergröße (cm) | 184,3 ± 8,0 |
| Körpergewicht (kg) | 78,5 ± 8,1 |
| Körperfettanteil (%) | 9,1 ± 3,4 |
| $VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) | 58,6 ± 6,3 |
| Maximale Leistung am Radergometer ($W_{max}$) | 410 ± 47,6 |
| Leistung an der VT 1 (W) | 204 ± 27,6 |
| Schweißrate bei 90 % der VT 1 ($l \cdot min^{-1}$) | 1,2 ± 0,2 |

Werte sind arithmetisches Mittel ± Standardabweichung; VT = ventilatorische Schwelle; $VO_{2max}$ = maximale Sauerstoffaufnahme.

Die Probanden wurden in einer sportmedizinischen Grunduntersuchung durch einen Facharzt als sporttauglich befunden und über das Ziel der Studie sowie die praktischen Inhalte und Risiken der Untersuchungen vertraut gemacht, bevor sie schriftlich ihr Einverständnis zur Teilnahme erklärten. Das Studienprotokoll wurde durch die Ethikkommission der Universität Ulm, Baden-Württemberg in Deutschland mit der Ethiknummer 73/13 genehmigt.

## 2.3 Vorbereitende Untersuchungen

Eine Woche vor Beginn der Studie absolvierten die Teilnehmer vorbereitende Untersuchungen bestehend aus:

- Beurteilung der Körperkomposition
- Durchführung eines Rampentests am Fahrradergometer (Lode Excalibur Sport, Groningen, Niederlande) zur Beurteilung der $W_{max}$, $VO_{2max}$ und der VT 1
- Einer einstündigen kontinuierlichen Radbelastung bei 90% der VT1 zur Beurteilung der Schweißrate durch Berechnung der Differenz des KG vor und nach dem einstündigen Test.

Beim Rampentest starteten die Teilnehmer mit einer Aufwärmphase ohne Widerstand über eine Minute. Danach wurde die Last alle 3 s um 2 W gesteigert bis die Teilnehmer keine Kadenz über 60 Umdrehungen halten konnten und der RQ über 1.1 lag. Der Gasaustausch wurde durch ein computerunterstütztes metabolisches Mischkammer System (Cortex MetaMax 3X, Leipzig, Germany) gemessen. Die Berechnung der VT 1 erfolgte durch die V-slope Methode (Wasserman, Whipp et al. 1973).

Die klimatisierte Raumtemperatur betrug dabei wie während der Studienuntersuchungen konstant 18 °C (Sareban, Zugel et al. 2016).

## 2.4 Vortestbedingungen

Um den Einfluss von Vortest-Aktivität und Vortest-Ernährung auf die Messparameter zu minimieren, wurden die Teilnehmer aufgefordert in den letzten 48 h vor den Untersuchungen intensiven Sport zu unterlassen. Zusätzlich wurden die Teilnehmer angehalten mindestens 48 h vor Beginn der Untersuchungen nach den aktuellen Empfehlungen (Rodriguez et al. 2009) auf eine ausgewogene Diät (> 50 % der Energie aus KH, Proteinzufuhr > 1,4 g/kg/d) bzw. vier Stunden vor Beginn der Untersuchungen auf eine kohlenhydratreiche Ernährung zu achten. Die Teilnehmer protokollierten ihre körperliche Aktivität und Diät in den 48 h vor der ersten Untersuchung. Vor der zweiten Untersuchung sollten die Teilnehmer nach dem erstellten Protokoll dieselbe Diät konsumieren bzw. auf die gleiche Menge an körperlicher Aktivität achten. Die Teilnehmer wurden aufgefordert eine etwaige Abweichung vom Ernährungs- bzw. Trainingsprotokoll im Rahmen der zweiten Untersuchung zu dokumentieren. Tabelle 2 (Seite 19) schlüsselt die Diät in Kalorien-, Kohlenhydrat-, Protein- und Fettzufuhr 48 h und 4 h vor den

Untersuchungen auf (Sareban, Zugel et al. 2016). Ausgewertet wurden die Protokolle mit einer Ernährungs-Organisationssoftware der Nutri-Science GmbH (PRODI®, Nutri-Science GmbH, Stuttgart, Germany).

## 2.5 Untersuchungsablauf

Am Untersuchungstag erfolgte zu Beginn die Dokumentation des nackten KG (Seca, Model 86, Hamburg, Deutschland) und anschließend wurde das Untersuchungsprotokoll gestartet (Abb.3). Wie bei einem Triathlon üblich, begannen die Probanden den Belastungstest mit dem Schwimmen (25m Hallenbad, chloriert, 27 °C, Lothar-Schultheißbad SSV Ulm 1848, Ulm, Deutschland). Die vorgegebene Dauer von 60 min entspricht der eines geübten Schwimmers bei einem Ironman-Wettkampf. Den Probanden wurde als Schwimmtempo 90% ihrer 400m Bestzeit vorgegeben. Die Zwischenzeiten wurden kontrolliert und die zurückgelegte Gesamtdistanz dokumentiert.

Unmittelbar nach Beendigung des Schwimmens wurde erneut das KG gemessen. Nach Transfer der Sportlers in das Labor (Transferzeit 19,8 ± 2,4 min), wurde das Belastungsprotokoll auf dem Fahrradergometer (Lode Excalibur Sport, Groningen, Niederlande) mit einer 180 minütigen Belastung entsprechend 90% der VT 1 fortgesetzt. Nach Beendigung der 180 Fahrradminuten wurde erneut das KG ohne Bekleidung gemessen. Die Transferzeit von Fahrrad auf Lauf blieb bei allen Teilnehmern und beiden Untersuchungen unter vier Minuten. Bei der abschließenden 60 minütigen Belastung am Laufband-Ergometer (Woodway, PPS Med, Weil am Rhein, Deutschland), wurden die Probanden dazu animiert, die größtmögliche Strecke zurück zu legen. Das Tempo konnte der Proband auf dem Display vom Laufband einsehen und manuell selbstständig ändern.

Die erreichte Distanz im abschließenden Lauf wurde dokumentiert und nach Beendigung der Laufbelastung erneut das unbedeckte KG protokolliert.

Die klimatisierte Raumtemperatur betrug an den Untersuchungstagen während Rad- und Laufbelastung wie im Rahmen der Vortest-Untersuchungen konstant 18 °C (Sareban, Zugel et al. 2016).

## 2.6 Kohlenhydratzufuhr

Am Tag der entsprechenden Untersuchungen erfolgte die Vorbereitung der Testernährung. Während beider Ernährungsstrategien erfolgte die Substitution der KH

mit einer Rate von 81 g · $h^{-1}$. Diese Dosis entspricht den aktuellen Empfehlungen für die Zufuhr exogener KH während Ausdauerbelastungen (Jeukendrup 2011) und gleicht der Dosis welche durch Konsum von drei Gel-Packungen erreicht wird. Das KG wurde bei der Dosis nicht berücksichtigt, da es entgegen der Empfehlungen von 2009 keine Korrelation zwischen KG und der Oxidation von exogenen KH zu geben scheint (Jeukendrup 2010).

Als GEL wurde das kommerziell erhältliche PowerBar Gel Original der Firma Nestle (PowerBar Gels, Nestle, Vevey, Schweiz) mit einer Menge von 27 g KH (Maltodextrin, Fruktose) pro Packung und einem Verhältnis Glukose:Fruktose von 2:1 angewendet. Die Gelprodukte enthielten nach Herstellerangaben kein Koffein und hatten ausschließlich Vanillegeschmack. Für jeden Teilnehmer wurde die entsprechende Menge GEL (drei Packungen pro Stunde) in 20ml Einmalspritzen (HSW SOFT-JECT® Luer, Henke SASS Wolf, Tuttlingen, Germany) aufgezogen und die Teilnehmer inkorporierten unter Kontrolle des Studienpersonals die Spritze oral. Zusätzlich wurde entsprechend der berechneten Schweißrate Wasser (Aloisius Quelle naturell, Gundelfingen, Deutschland) konsumiert.

Für die Zubereitung von LIQ wurden 54 g kommerziell erwerbliches Maltodextrin 19 (Lamperts Malodextrin19, Berco, Kieve, Deutschland) und 27 g Fruktose (Fruktosum, Fragon, Barsbüttel, Deutschland) in einem Wasservolumen gelöst, das der berechneten Schweißverlustrate pro Stunde entsprach (Aloisius Quelle naturell, Gundelfingen, Deutschland).

Direkt nach dem Schwimmen erhielten die Probanden einen Bolus von 300 ml Wasser mit 27 g gelösten KH oder 1 Packung GEL mit zusätzlich 300 ml Wasser je nach Studienprotokoll.

Während dem Radfahren und dem anschließendem Laufen wurden GEL und LIQ entsprechend der Empfehlungen (Rodriguez, Di Marco et al. 2009) in einem Intervall von 15 min gegeben, so dass die KH Zufuhr einer Rate von 81 g · $h^{-1}$ entsprach.

Um eine Dehydrierung der Sportler zu vermeiden, wurde die zu konsumierende Flüssigkeitsmenge zwischen LIQ und GEL entsprechend der in der vorbereitenden Untersuchung ermittelten individuellen Schweißrate angeglichen und die Probanden motiviert, die komplette Flüssigkeit (Aloisius Quelle naturell, Gundelfingen, Deutschland) zu konsumieren (Sareban, Zugel et al. 2016). Natriumchlorid wurde LIQ beigemengt, so dass die Natriumchlorid-Menge der bei GEL entsprach (0,6 g · $h^{-1}$).

## 2.7 Datenakquise

Die primären Messgrößen zur Beurteilung der Studienfragen waren die zurückgelegte Distanz des abschließenden Laufs, Blutglukose und Laktatkonzentration, RQ, subjektives Belastungsempfinden und GI Beschwerden (Sareban, Zugel et al. 2016). Zusätzlich erfolgte eine Berechnung der Gesamtkosten für die jeweilige Ernährungsstrategie.

Zu Beginn der Radbelastung, alle 60 min beim Radfahren sowie nach 30 min und am Ende der Laufbelastung wurde die ausgeatmete Luft mit dem Douglas Bag für 1 min gesammelt. Drei Proben wurden vom Beutel entnommen und Sauerstoff und Kohlendioxid-Konzentrationen mittels photoakustischer Spektroskopie (Innocor, Innovision, Odense, Dänemark) berechnet. Der RQ wurde nach Mittelung der drei Werte berechnet.

Zu Beginn der Radbelastung, alle 60 min beim Radfahren sowie nach 30 min und am Ende der Laufbelastung wurde aurikulär kapillares Blut vom hyperämisierten Ohrläppchen entnommen und die Blutzucker- und Laktatkonzentration mit Hilfe einer enzymatisch-amperiometrischen Methode bestimmt (EKF Diagnostics, Bioson C-Line, Cardiff, Großbritannien).

Das subjektive Belastungsempfinden wurde zu Beginn der Radbelastung, alle 60 min beim Radfahren sowie nach 30 min und am Ende der Laufbelastung mit Hilfe der 6-20 Borg-Skala (Borg 1974) ermittelt.

Zu festgelegten Zeitpunkten wurden die Teilnehmer vom Studienpersonal nach GI Beschwerden befragt. Zusätzlich mussten die Teilnehmer nach Beendigung der Laufbelastung Fragen bezüglich häufiger GI Beschwerden (Blähung, Stuhldrang, Stuhlgang, Bauchkrämpfe, Schmerzen, Durchfall) beantworten.

Die Berechnung des Volumenanteils des Körpergewichtverlustes erfolgte über folgende Formel:

$$\textbf{KG Verlust [\%]} = (KG_{Vortest}\ [kg] - KG_{Posttest}\ [kg]) * 100 / KG_{Vortest}$$

Die Dokumentation der Herzfrequenz erfolgte kontinuierlich durch einen Herzfrequenzmonitor (Suunto Team Pod, Vaanta, Finnland).

Die Kosten für die GEL und LIQ-Strategie bzw. den im Rahmen der Studie verwendeten Produkten wurden als € / h berechnet.

## 2.8 Ergometrie

### 2.8.1 Fahrrad-Ergometrie

Für die Fahrrad-Ergometrie wurde bei der Eingangsuntersuchung und den Studienuntersuchungen das gleiche drehzahlgesteuerte Radergometer verwendet (Lode Excalibur Sport, Groningen, Niederlande). Das Ergometer misst zwischen 10 und 1000 W mit einer Abweichung von ± 2 %. Die Trittfrequenz wird angezeigt. Die Sportler nutzten ihre gewohnten Klickpedale und Radschuhe. Die Sitzposition konnte von den Sportlern frei angepasst werden.

### 2.8.2 Laufband-Ergometrie

Das PPS Med Laufband (Woodway, PPS Med, Weil am Rhein, Deutschland) ist ein Laufband mit einem zahnriemengeführten Antriebssystem und einer Maximalgeschwindigkeit von bis zu 24 km/h. Das Tempo kann dabei auf einem Monitor abgelesen werden und es besteht die Möglichkeit einer manuellen Änderung der Geschwindigkeit durch den Sportler selbst.

### 2.8.3 Sonstige Messgeräte

Körpergewicht: Personenwaage Seca Model 86, Hamburg, Deutschland

Körperfettbestimmung: 3-Punkte Hautfalten Kalipermethode (Harpenden Skinfold Caliper, West Sussex, Großbritannien). Als Messfalten wurden dabei Brust, Bauch und Oberschenkel verwendet. Die Berechnung erfolgte nach der Formel von Jackson und Pollock (Jackson and Pollock 1978):

$$\mathbf{D = 1{,}0994921 - 0{,}0009929*S + 0{,}0000023*S^2 - 0{,}0001392*Alter}$$

$$\mathbf{S = Brust + Bauch + Oberschenkel}$$

$$\mathbf{Fett\ [\%] = 495 / D - 450}$$

## 2.9 Metabolische Parameter

### 2.9.1 Douglas Bag-Methode

Die Exspirationsluft wurde zu definierten Zeitpunkten (siehe Abb.3) mit Hilfe eines Mundstücks und einem Klappenventilapparat über 60 s in einem ausreichend fassenden Volumen (Douglas Bag) gesammelt.

#### *2.9.1.1 Der respiratorische Quotient*

Drei Proben der Ausatemluft wurden dann aus dem Douglas Bag entnommen und im Anschluss photoakustisch und spektroskopisch der Anteil des exspiratorischen Kohlenstoffdioxids ($FECO_2$) - und Sauerstoffgehalts ($FEO_2$) bestimmt (Innocor, Innovision, Odense, Dänemark). Aus den Werten wurde der respiratorische Quotient (RQ) ermittelt:

$$\mathbf{RQ = FECO_2/FEO_2}$$

Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der Makronährstoffe werden unterschiedliche Mengen an $O_2$ für die komplette Oxidation zu $CO_2$ und $H_2O$ benötigt. Dadurch unterscheidet sich der Quotient aus gebildetem $CO_2$ und aufgenommenen $O_2$ je nach verbrauchtem Substrat. Bei reiner KH-Oxidation gleicht die Menge an gebildetem $CO_2$ der aufgenommenen $O_2$-Menge und ergibt somit einen RQ von 1,0. Für die Oxidation von Fetten wird mehr Sauerstoff benötigt und der RQ beträgt bei reinem Fettstoffwechsel 0,7. Bei starker körperlicher Belastung muss die metabolisch bedingte Azidose respiratorisch durch Hyperventilation und vermehrter $CO_2$ Ausatmung kompensiert werden und der RQ übersteigt daher 1,0 (Jeukendrup and Gleeson 2010).

### 2.9.2 Bestimmung von Laktat und Blutglukose

Die Laktat- und Blutzuckerkonzentrationen wurden aus 20 µl Kapillarblut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen bestimmt und die Proben direkt in 1000 µl EKF `Safe Lock´ Reaktionsgefäße mit Systemlösung hämolysiert. Zur Datenerfassung diente das enzymatisch-amperiometrischen Messprinzip (EKF Diagnostics, Bioson C-Line, Cardiff, Großbritannien). Dabei wird durch das membranständige Enzym Laktatoxidase/ Glukoseoxidase die Oxidation von Laktat/ Glukose und Sauerstoff hin zu Pyruvat/

Gluconsäure und Wasserstoffperoxid katalysiert. Letzteres wird an einer Arbeitselektrode oxidiert und kann schließlich als fortwährendes Messsignal abgeleitet werden (Abb.4). Der gemessene Elektrolysestrom ist proportional zur Laktat- bzw. Glukosekonzentration (EBIO®plus 2000).

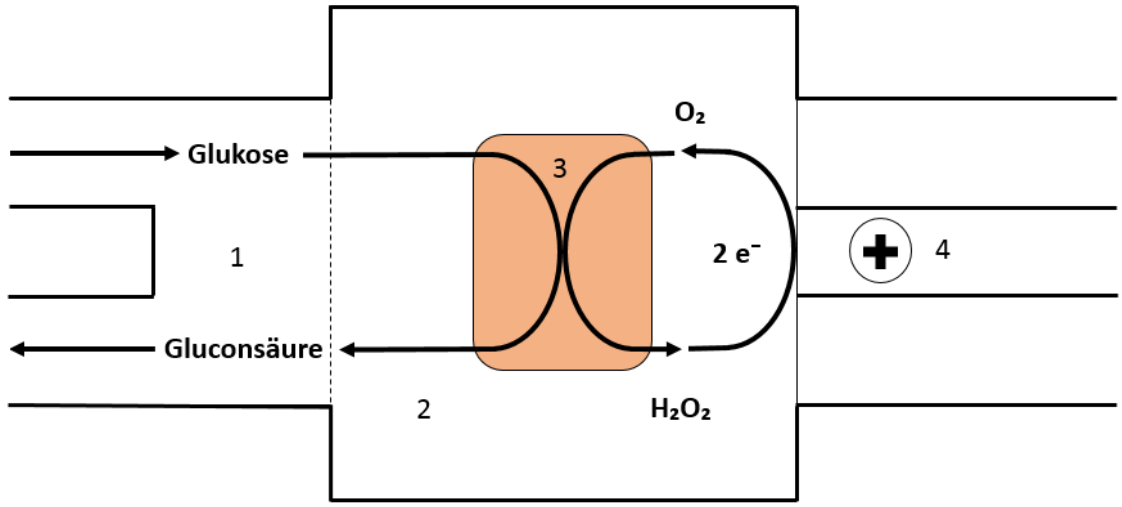


**Abb.4: Schematische Darstellung des enzymatisch-amperiometrischen Messprinzips am Beispiel der Blutglukosebestimmung: In einer Messkammer (1) wird das membranständige Enzym Glukoseoxidase die Oxidation von Glukose und Sauerstoff ($O_2$) zu Gluconsäure und Wasserstoffperoxid ($H_2O_2$) katalysiert (2,3). Letzteres wird an einer Platinelektrode (4) oxidiert und kann schließlich als fortwährendes Messsignal abgeleitet werden. Der gemessene Elektrolysestrom ist proportional zur Glukosekonzentration (Graphik erstellt nach EBIO®plus 2000 mit freundlicher Genehmigung der Firma Eppendorf).**

## 2.9.3 Sonstige Messgrößen

### *2.9.3.1 Ventilationsschwelle (VT)*

Die ventilatorischen Schwellen werden an zwei Punkten definiert, die erste (VT 1) und zweite ventilatorische Schwelle (VT 2). Bei steigender Belastungsintensität und parallel dazu zunehmende Energiebereitstellung durch die anaerobe Glykolyse wird durch die notwendige Protonenpufferung vermehrt $CO_2$ gebildet. Der Bereich in dem dadurch die $CO_2$ Abatmung im Verhältnis zur $O_2$ Aufnahme steigt, wird als VT 1 bezeichnet und entspricht metabolisch dem ersten Laktatanstieg (Wasserman, Whipp et al. 1973). Bei der VT 2, auch bezeichnet als respiratorischer Kompensationspunkt (RCP), ist eine Abpufferung der aus der Milchsäure anfallenden Protonen nicht mehr vollständig

möglich, so dass der abfallende pH die Atmung zusätzlich stimuliert. Angesichts des physiologischen Hintergrunds und basierend auf der Erfahrung des Studienteams sahen wir eine Intensität von 90 % der VT 1 als eine Leistung an, bei der die Teilnehmer das dreistündige Fahrradprotokoll sicher beenden sollten. Die Ermittlung der VT 1 erfolgte automatisiert mit Hilfe der V-slope Methode (Beaver, Wasserman et al. 1986) und wurde visuell vom Spiroergometrie erfahrenen Studienpersonal kontrolliert und ggf. korrigiert.

#### *2.9.3.2 $VO_{2max}$*

Die maximale Sauerstoffaufnahme ($VO_{2max}$) ist eine Standardmessgröße der aeroben Leistungsfähigkeit. Dabei handelt es sich um die maximale Sauerstoffmenge die pro Minute verbraucht wird. Eine genaue Bestimmung der $VO_{2max}$ während der Spiroergometrie setzt eine hohe kardiopulmonale Ausbelastung voraus. Anhand folgender Kriterien wurde diese im Rahmen der Arbeit beurteilt: ein RQ ≥ 1,1, ein Abflachen der $O_2$-Aufnahmekurve und wenn die Teilnehmer am Fahrradergometer eine Kadenz von 60 Umdrehungen nicht mehr leisten konnten.

## 2.10 Statistische Auswertung

Diese Studie nutzte ein Crossover-Design zur Beantwortung der Studienfragen (Sareban, Zugel et al. 2016). Der wesentliche Unterschied zwischen einem Crossover- und einem herkömmlichen Parallelgruppen-Versuch liegt darin, dass jeder Studienteilnehmer als seine eigene Kontrolle dient. Konfundierende Variablen zwischen einer Versuchs- und Kontrollgruppe können somit die Studienergebnisse nicht verfälschen. Ein weiterer Vorteil des Crossover-Designs besteht darin, dass man mit einer geringeren Fallzahl auskommt als bei einem Parallelgruppenversuch. Aufgrund des erstmalig unter Laborbedingungen durchgeführten Belastungsprotokolls im Triathlon Format mit dem Endpunkt Laufleistung, standen keine publizierten Daten für eine Fallzahlkalkulation zur Verfügung.

Das Crossover-Design setzt jedoch einige statistische Überlegungen voraus, auf die im Folgenden eingegangen werden soll und welche in Abbildung 5 schematisch dargestellt werden.

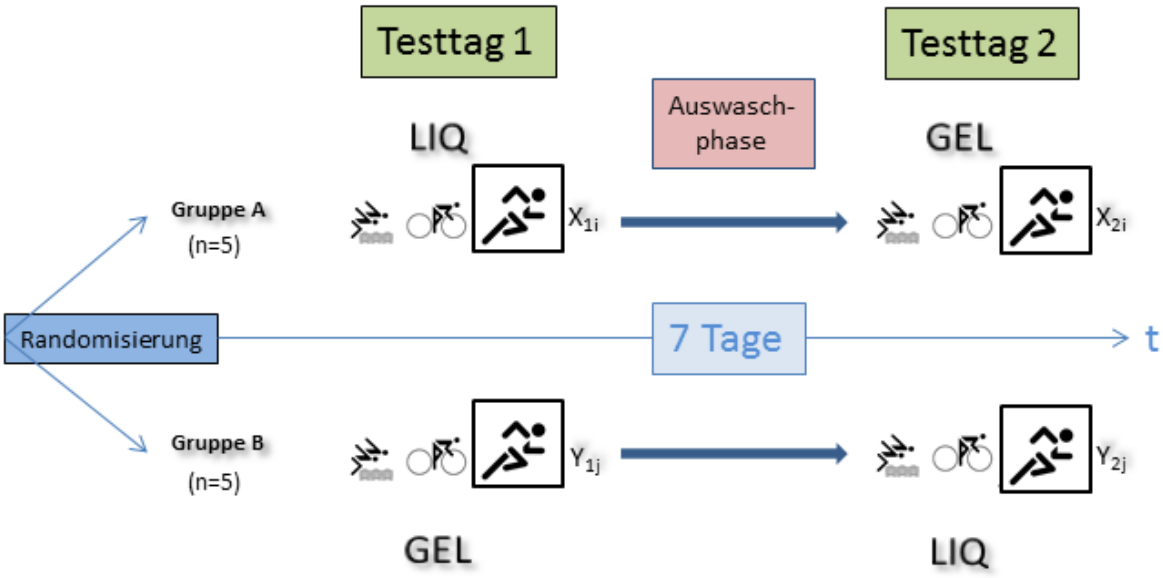


**Abb.5: Schema des Crossover-Versuchs dargestellt über den Zeitverlauf. Randomisierte Einteilung der Probanden in die Sequenzgruppen A (LIQ-GEL) und B (GEL-LIQ). $X_{1i}$ bzw. $X_{2i}$ = Testtag 1 bzw. Testtag 2 von Proband i aus Gruppe A; $Y_{1j}$ bzw. $Y_{2j}$ = Testtag 1 bzw. Testtag 2 von Proband j aus Gruppe B. Eine Auswaschphase von 7 Tagen zwischen Testtag 1 und Testtag 2 wurde gewählt (Graphik erstellt nach Wellek und Blettner 2012). t = Zeit; GEL = semisolide Ernährungsstrategie; LIQ = flüssige Ernährungsstrategie.**

### 2.10.1 Vorschalttest zum Ausschluss von relevanten Periodeneffekten

Das Studienteam legte basierend auf der eigenen Erfahrung im Langstrecken-Triathlon als Dauer der Auswaschphase sieben Tage fest. Eine korrekte Interpretation der Ergebnisse setzt jedoch voraus, dass die Auswaschphase ausreichend lang ist, um eine Vermengung von Behandlungs- und Periodeneffekten ausschließen zu können. Eine Gewöhnung an die Studiensituation könnte in Form eines Trainingseffektes das Laufergebnis verbessern und so die Interventionen falsch positiv beeinflussen. Entgegengesetzt könnte eine zu kurz gewählte Regenerationsphase die Leistungsfähigkeit im abschließenden Lauf zu einem falsch negativen Ergebnis führen. Um diese Effekte auszuschließen, wurde die Auswaschphase von 7 Tagen über einen Vorschalttest überprüft. Dabei wurden zwei Sequenzgruppen A (LIQ-GEL) und B (GEL-LIQ) gebildet. Die zu betrachtenden Messwerte für die Auswertung waren die intraindividuellen Summen zwischen den Endpunkten beider Sequenzen. Im Anschluss erfolgte nach Test auf Normalverteilung (Mann-Whitney-U Test) ein unverbundener t-Test der Sequenzgruppen LIQ-GEL und GEL-LIQ (Wellek and Blettner 2012).

### 2.10.2 Konfirmatorischer Test auf Unterschiedlichkeit der Behandlungseffekte

Um den Unterschied der Studienendpunkte zwischen den beiden Ernährungsstrategien vergleichen zu können, wurde nach Test auf Normalverteilung ein unverbundener t-Test mit den intra-individuellen Differenzen zwischen den Ergebnissen aus beiden Versuchsperioden für die zurückgelegte Distanz während der Laufbelastung sowie die im Verlauf erhobenen RQ, Blutglukose, Laktat und BORG-Daten verwendet (Wellek and Blettner 2012). Ein verbundener t-Test (McNemar`s Test) wurde für den Vergleich der GI Verträglichkeit zwischen den beiden Konditionen verwendet (Sareban, Zugel et al. 2016).
Die statistische Analyse der Ergebnisse wurde im SPSS 19 für Windows ausgeführt (SPSS, Inc., Chicago, IL). Alle Werte sind dargestellt als arithmetisches Mittel ± Standardabweichung. Die statistische Signifikanz wurde bei $p < 0,05$ festgelegt (Sareban, Zugel et al. 2016).

# 3 Ergebnisse

Neun von zehn Probanden konnten beide Versuche komplett beenden. Ein Teilnehmer musste im zweiten Teil des Crossover Designs zu Beginn der Laufbelastung aufgrund von körperlicher Erschöpfung die Studie vorzeitig beenden, weshalb die Daten des Probanden von der Analyse ausgeschlossen wurden (Sareban, Zugel et al. 2016).

## 3.1 Ernährung vor den Untersuchungen

Die Kalorienzufuhr während der letzten 48 h vor den Versuchen zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsgruppen (Sareban, Zugel et al. 2016). Die durchschnittlich zugeführte KH-Menge betrug 5,3 ± 0,5 $g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ (GEL) und 5,1 ± 0,4 $g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ (LIQ), p = 0,73. Außerdem gab es keinen signifikanten Unterschied in der zugeführten Protein- und Fettmenge zwischen GEL und LIQ vor den Versuchen. Ein ähnliches Bild ergab sich für die diätetische Analyse 4h vor Untersuchungsbeginn mit insignifikanten Unterschieden in der Zufuhr von Nährstoffen (Tab. 2).

**Tab.2: Diät der Teilnehmer 48h und 4h vor den Untersuchungen (Ulm 2013). GEL = semisolide Ernährungs-strategie; LIQ = flüssige Ernährungsstrategie.** Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060. © Human Kinetics, Inc.

| | GEL | LIQ | P |
|---|---|---|---|
| | *48 h vor den Untersuchungen* | | |
| Kalorienzufuhr (kcal/d) | 2788 ± 351 | 2608 ± 265 | 0,339 |
| Kohlenhydratzufuhr (g/kg/d) | 5,3 ± 0,5 | 5,1 ± 0,4 | 0,727 |
| Proteinzufuhr (g/kg/d) | 1,2 ± 0,3 | 1,1 ± 0,3 | 0,786 |
| Fettzufuhr (g/kg/d) | 0,9 ± 0,1 | 0,8 ± 0,1 | 1,000 |
| | *4 h vor den Untersuchungen* | | |
| Kalorienzufuhr (kcal) | 1623 ± 306 | 1670 ± 257 | 0,777 |
| Kohlenhydratzufuhr (g/kg) | 4,9 ± 0,4 | 4,8 ± 0,4 | 0,671 |
| Ballaststoffzufuhr (g/kg) | 4,8 ± 3,5 | 4,9 ± 3,5 | 0,780 |
| Proteinzufuhr (g/kg) | 0,3 ± 0,1 | 0,3 ± 0,1 | 0,734 |
| Fettzufuhr (g/kg) | 0,3 ± 0,1 | 0,3 ± 0,1 | 0,687 |

Werte sind arithmetisches Mittel ± Standardabweichung.

## 3.2 Schwimm- und Radleistung

Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied bei der zurückgelegten Schwimmdistanz zwischen den beiden Behandlungsgruppen (3473± 311m GEL bzw. 3534 ± 314m LIQ, p = 0,69).

Die Teilnehmer begannen die Radbelastung mit einer durchschnittlichen Leistung von 204,1 ± 27,6 W. Bei vier Teilnehmern (GEL: n = 3; LIQ: n = 1) musste die Leistung um 22,7 ± 7,7 W nach 66,3 ± 46,8 min während des ersten Versuchs reduziert werden, um einen vorzeitigen Testabbruch zu verhindern. Die entsprechenden Änderungen wurden jedoch im zweiten Versuch zur gleichen Zeit vorgenommen, so dass die erbrachte Gesamtleistung während beider Radbelastungen identisch war (Sareban, Zugel et al. 2016).

## 3.3 Laufleistung

Die Teilnehmer legten im Durchschnitt eine Distanz von 11,81 km während der einstündigen Laufbelastung unter GEL-Ernährung zurück und 11,91 km während LIQ-Ernährung (Sareban, Zugel et al. 2016). Der Vorschalttest schloss relevante Periodeneffekte aus (p = 0,89). Der Leistungsunterschied zwischen den Behandlungsgruppen war statistisch nicht signifikant (p = 0,88).

## 3.4 Flüssigkeits- und Kohlenhydratzufuhr während der Untersuchungen

Die Flüssigkeitszufuhr während des gesamten Belastungsprotokolls war bei GEL (3,9 ± 0,54 l / 0,78 ± 0,11 ml · $h^{-1}$) im Vergleich zu LIQ (4,2 ± 0,25 l / 0,84 ± 0,5 ml · $h^{-1}$) tendenziell geringer (p = 0,10). Das KG nahm während beider Versuche ab, ohne dass eine statistische Signifikanz zwischen den beiden Behandlungsgruppen erreicht wurde (1,6 ± 0,7 % (GEL) bzw. 1,9 ± 0,5 % (LIQ); p = 0,17), (Sareban, Zugel et al. 2016).

Die gesamte KH-Zufuhr bei GEL betrug 336 ± 36 g (67,2 ± 7,2 g · $h^{-1}$) bzw. 339 ± 21 g (67,8 ± 4,2 g · $h^{-1}$) während LIQ (p = 0,85). Abbildung 6 veranschaulicht den Verlauf der KH-Zufuhr (Sareban, Zugel et al. 2016).

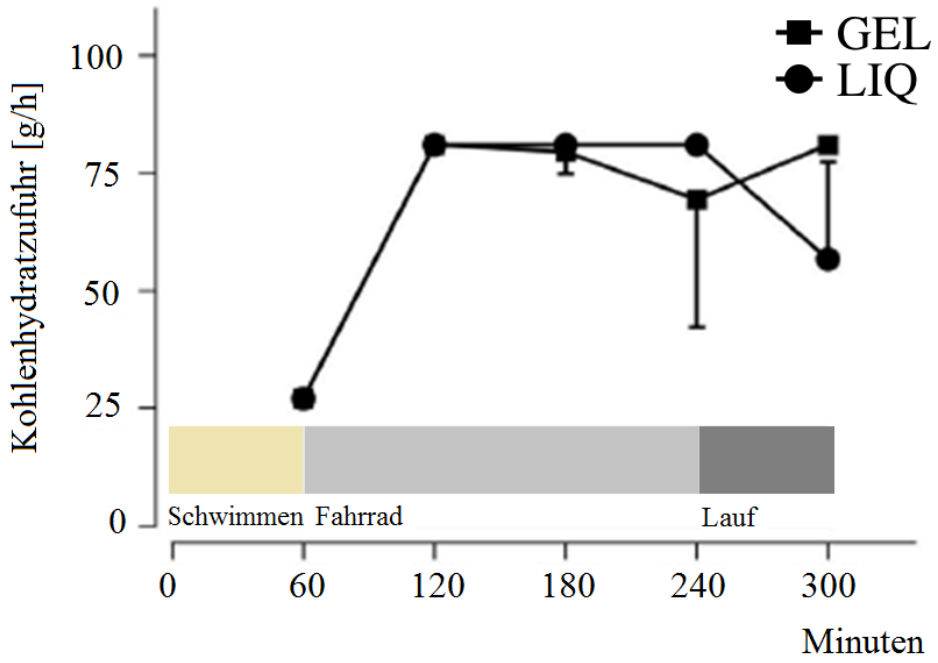


**Abb.6: Verlauf KH-Zufuhr (g/h). Direkt nach dem Schwimmen (Minute 60) erhielten die Probanden einen Bolus von 300 ml LIQ oder 1 Packung GEL mit zusätzlich 300 ml Wasser. Die Kohlenhydratmenge betrug dabei 27 g. Während des Radfahrens und des abschließenden Laufs wurden den Langstrecken-Triathleten GEL und LIQ in einem Intervall von 15 min gegeben, so dass die KH-Zufuhr einer Rate von 81 g · $h^{-1}$ entsprach (Ulm 2013). Minute 240 zeigt einen Abfall der Kohlenhydratzufuhr bei GEL. Im abschließenden Lauf war die KH-Zufuhr bei LIQ nur reduziert möglich. KH = Kohlenhydrate; GEL = semisolide Ernährungsstrategie; LIQ = flüssige Ernährungsstrategie.** Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060. © Human Kinetics, Inc.

## 3.5 Blutzucker- und Laktatverlauf

Während beider Versuche blieb die Blutglukose bis zum abschließenden Lauf stabil (Abb.7). Zu keinem Zeitpunkt während der Versuche unterschied sich die Blutglukose statistisch signifikant zwischen den Behandlungsgruppen (Sareban, Zugel et al. 2016). Ein Trend des Blutglukoseabfalls bei LIQ zeichnete sich jedoch im abschließenden Lauf ab. Am Ende der Laufbelastung betrug die Blutglukose 5,7 ± 1,5 mmol · $l^{-1}$ bei GEL bzw. 4,4 ± 1.0 mmol · $l^{-1}$ bei LIQ ($p = 0,22$).

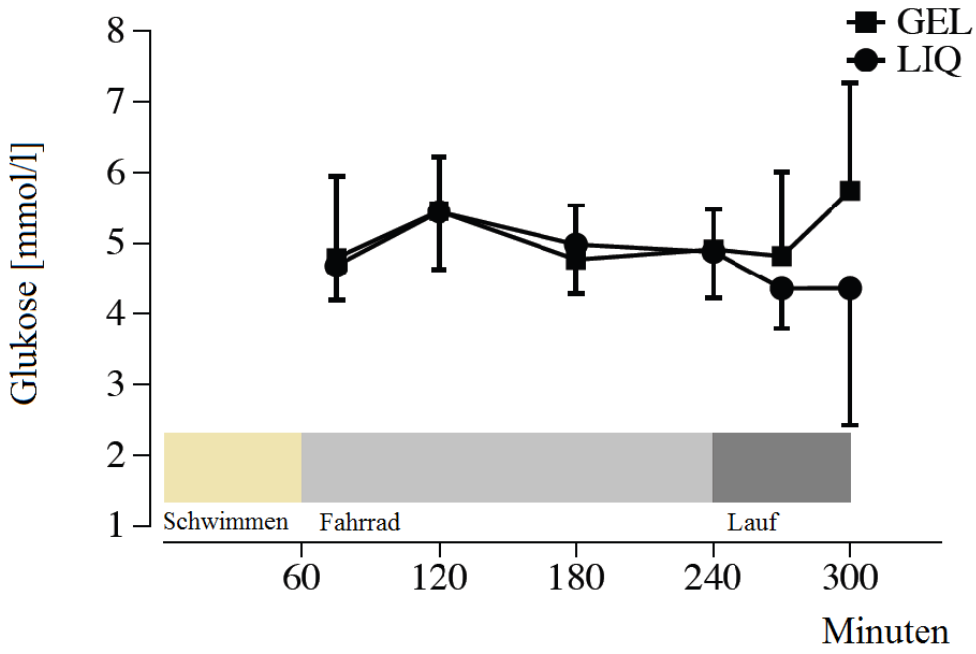


**Abb.7: Verlauf Blutglukose (mmol/L). Die Blutglukose der Probanden wurde nach dem Schwimmen erstmals gemessen. Während des Radfahrens erfolgte die Blutglukosebestimmung der Langstrecken-Triathleten stündlich, beim abschließenden Lauf all 30 Minuten (Ulm 2013). An keinem Punkt zeigt sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen: p < 0,05. Ein Trend des Blutglukoseabfalls bei LIQ zeichnete sich jedoch im abschließenden Lauf ab. GEL = semisolide Ernährungsstrategie; LIQ = flüssige Ernährungsstrategie.** Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060. © Human Kinetics, Inc.

Die Laktatkonzentration nahm nach der Fahrradbelastung während beider Versuche aufgrund der höheren Intensität der Laufbelastung zu (Abb.8), der Unterschied war jedoch zu keinen Zeitpunkt zwischen den Behandlungsgruppen statistisch signifikant (Sareban, Zugel et al. 2016). Die Laktatkonzentration am Ende der Laufbelastung betrug 2,3 ± 0,9 mmol · $l^{-1}$ (GEL) bzw. 2,1 ± 1,1 mmol · $l^{-1}$ (LIQ) (p = 0,70).

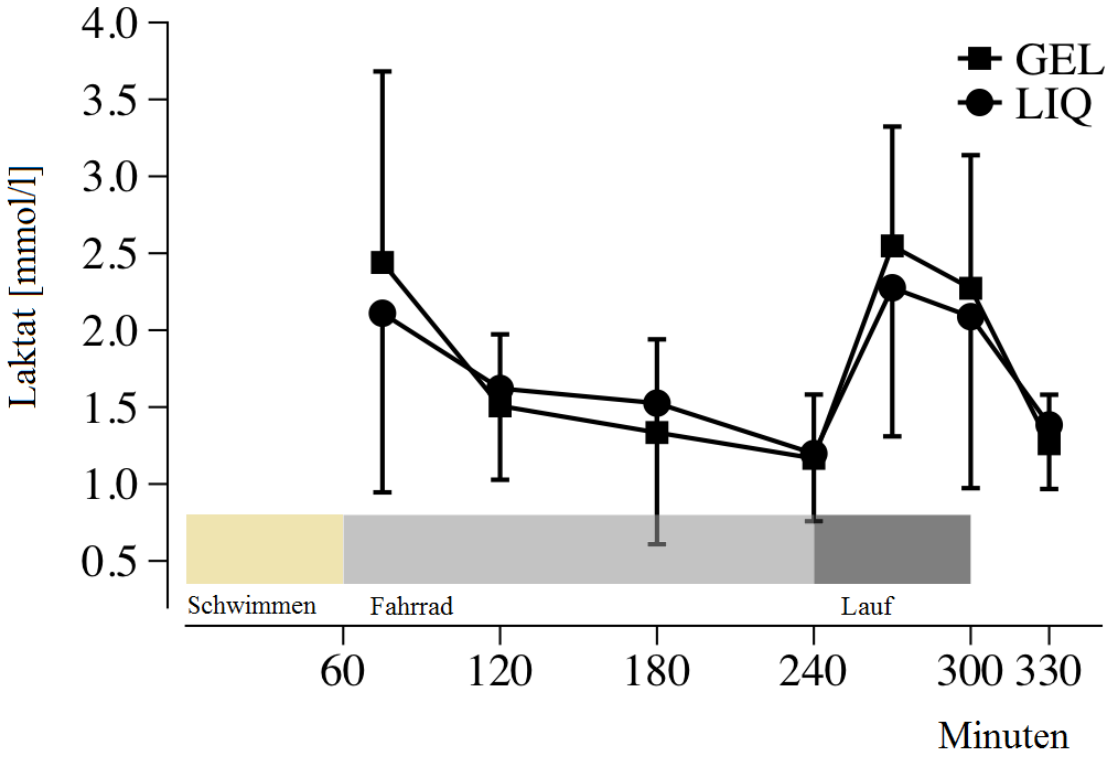


**Abb.8: Verlauf Blutlaktat (mmol/l). Die erste Messung des Blutlaktats der Probanden erfolgte nach dem Schwimmen. Während des Radfahrens erfolgte die Blutlaktatbestimmung der Langstrecken-Triathleten stündlich, beim abschließenden Lauf all 30 Minuten gefolgt von einer Blutlaktatbestimmung 30 Minuten nach Belastung (Ulm 2013). An keinem Punkt zeigt sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden behandelten Gruppen: p < 0,05. GEL = semisolide Ernährungsstrategie; LIQ = flüssige Ernährungsstrategie.** Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060. © Human Kinetics, Inc.

## 3.6 Verlauf des respiratorischen Quotienten

Bei reiner KH-Oxidation gleicht die Menge an gebildetem $CO_2$ der aufgenommenen $O_2$-Menge und ergibt somit einen RQ von 1,0. Für die Oxidation von Fetten wird mehr Sauerstoff benötigt und der RQ beträgt bei reinem Fettstoffwechsel 0,7. Der RQ nahm kontinuierlich während Rad- sowie Laufbelastung ab, jedoch bestand zu keinem Zeitpunkt ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Behandlungsgruppen (Abb.9). Der RQ am Ende der Laufbelastung war bei GEL 0,88 ± 0,21 bzw. 0,88 ± 0,37 bei LIQ ($p = 0,78$).

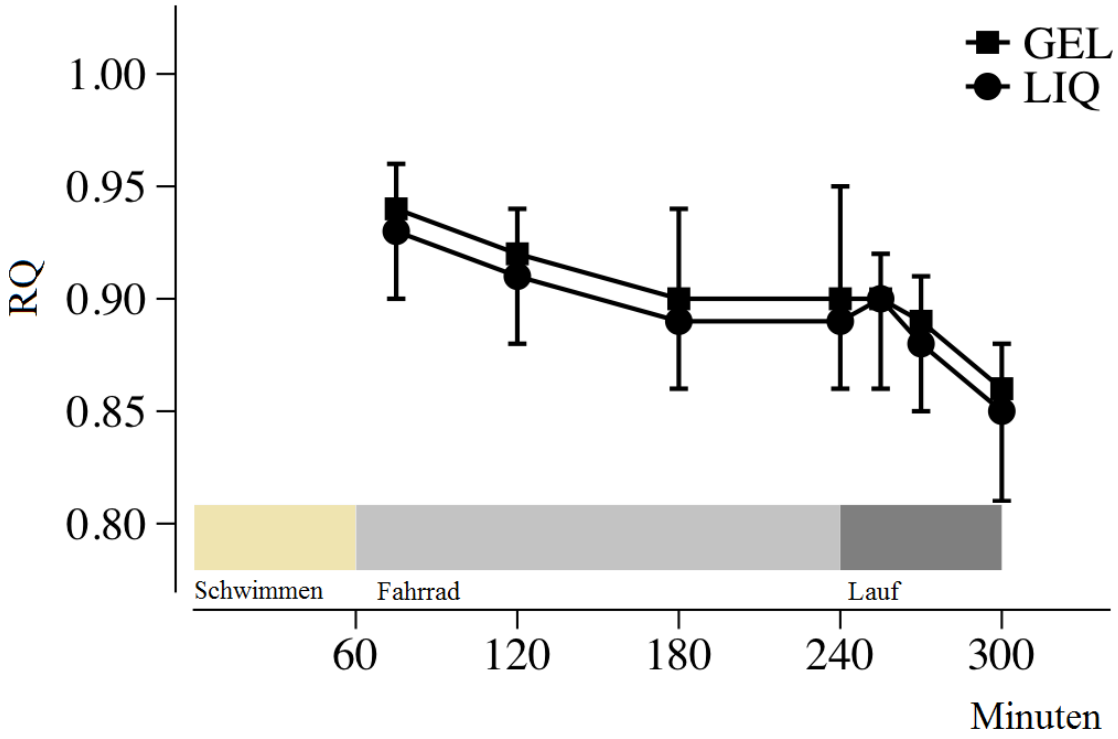


**Abb.9: Verlauf Respiratorischer Quotient. Der RQ wurde nach 15 Minuten Radfahren erstmals gemessen. Während des Radfahrens erfolgte die Bestimmung des RQs von Langstrecken-Triathleten stündlich, beim abschließenden Lauf all 30 Minuten (Ulm 2013). An keinem Punkt zeigt sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden behandelten Gruppen: $p < 0,05$. Bei reiner KH-Oxidation gleicht die Menge an gebildetem $CO_2$ der aufgenommenen $O_2$-Menge und ergibt somit einen RQ von 1,0. Für die Oxidation von Fetten wird hingegen mehr Sauerstoff benötigt und der RQ beträgt 0,7. RQ = Respiratorischer Quotient; KH = Kohlenhydrate; GEL = semisolide Ernährungsstrategie; LIQ = flüssige Ernährungsstrategie.**
Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060.
© Human Kinetics, Inc.

## 3.7 Subjektives Belastungsempfinden

Zu keinem Zeitpunkt bestand ein statistisch signifikanter Unterschied der BORG-Daten zwischen den Behandlungsgruppen (Sareban, Zugel et al. 2016). Die BORG-Analyse am Ende der Laufbelastung ergab bei GEL 16,2 ± 1,9 bzw. 16,3 ± 1,3 bei LIQ ($p = 0,85$).

## 3.8 Gastrointestinale Symptome

Sieben der neun Teilnehmer gaben GI Beschwerden unter GEL-Bedingungen an (Tab. 3). Ein Teilnehmer hatte zwischen Rad- und Laufbelastung Stuhlgang. Kein Teilnehmer gab GI Beschwerden unter LIQ-Bedingungen an (Sareban, Zugel et al. 2016). Der Unterschied der Häufigkeit von GI Beschwerden zwischen den Behandlungsgruppen war statistisch signifikant (p = 0,016).

**Tab. 3: Gastrointestinale Verträglichkeit der Probanden während der Untersuchungen (Ulm 2013). GEL = semisolide Ernährungsstrategie; LIQ = flüssige Ernährungsstrategie.** Erstveröffentlichung in: Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26 (2): 114-122, doi: 10.1123/ijsnem.2015-0060. © Human Kinetics, Inc.

| Symptome | GEL | LIQ | P |
|---|---|---|---|
| Blähungen | 5 | 0 | |
| Blähungen + Stuhldrang | 1 | 0 | |
| Blähungen + Stuhlgang | 1 | 0 | |
| Insgesamt | 7 | 0 | 0,016 |

n = 9

## 3.9 Kostenvergleich

LIQ kostete bei Gebrauch von 81 g KH pro Stunde und einem Mischverhältnis von Glukose:Fruktose von 2:1 sowie den in 2.6 genannten Produkten 0,75 € / h/ Proband. Die GEL-Alternative, die im Rahmen der Arbeit verwendet wurde rund 4,50 € / h/ Proband. Somit ist die GEL-Strategie sechsmal so teuer wie LIQ (Sareban, Zugel et al. 2016).

# 4 Diskussion

Hauptzielsetzung der Arbeit war es, die Wirkung exogener KH in Form von GEL bzw. LIQ auf die Leistungsfähigkeit, methodisch gemessen an der zurückgelegten Distanz im abschließenden Lauf, in einem unter Laborbedingungen simulierten Langstrecken-Triathlon zu vergleichen. Metabolische Parameter, wie das Verhalten von Blutglukose-, RQ und Laktatverlauf wurden beschrieben. Insbesondere der Blutglukoseverlauf, als auch der RQ sollen als Surrogat das Resorptions- und Oxidationsverhalten der Ernährungsstrategien prüfen. Die GI Verträglichkeit wurde anhand eines Fragebogens untersucht. Zuletzt erfolgte ein Vergleich der entstehenden Kosten beider Interventionen (Sareban, Zugel et al. 2016).

## 4.1 Leistungsfähigkeit

Die vorliegende Arbeit ergänzt Ergebnisse von bereits existierenden Studien mit kürzeren Belastungsprotokollen und entweder Rad- oder Laufbelastungen welche die Auswirkung exogen zugeführter KH in Form von GEL bzw. LIQ auf die Leistungsfähigkeit untersucht haben und ebenfalls keinen Unterschied nachweisen konnten (Campbell, Prince et al. 2008).

In einer Arbeit von Campbell et al. wurden im Rahmen einer 80 min Fahrrad-Ergometriebelastung mit einer Intensität von 75% der $VO_{2max,}$ gefolgt von einem 10-km Zeitfahren, die beiden Ernährungsstrategien GEL und LIQ gegenübergestellt und zusätzlich mit Wasser als Kontrolle verglichen. Die Arbeitsgruppe fand heraus, dass eine exogene KH-Zufuhr in Form von GEL zu einer 2,8% Verbesserung der Leistungsfähigkeit beim Zeitfahren gegenüber Wasser führt, jedoch keine ergogenen Vorteile erzielt, wenn die gleiche Menge an KH in flüssiger Form verabreicht wird (Campbell, Prince et al. 2008).

Die aktuellen Empfehlungen (Rodriguez, Di Marco et al. 2009) für Ernährung während Ausdauersportarten beschreiben einen Leistungsvorteil abhängig von der Zufuhr exogener KH, jedoch unabhängig von der Darreichungsform. Burke et al. verglichen bei trainierten Läufern im Rahmen von zwei Halbmarathonläufen mit einem Abstand von drei Wochen GEL mit Wasser. Dabei war der Vorteil von GEL gegenüber Wasser jedoch nur marginal (0,3% Leistungssteigerung durch GEL) und statistisch nicht signifikant (Burke, Wood et al. 2005). Die Vermutung liegt nahe, dass die in einem Halbmarathon erzielbare

Belastungsdauer für trainierte Läufer zu kurz ist, um mit einer exogenen KH-Zufuhr in Form von GEL die Laufleistung zu verbessern.

## 4.2 Metabolische Parameter

Die metabolischen Parameter dienten in der vorliegenden Arbeit zur Prüfung der Aufnahme- und Oxidationsfähigkeit der exogen zugeführten KH im Rahmen von GEL und LIQ. Dabei wurden die Blutglukose und der RQ in zeitlich definierten Abständen untersucht (Abb.3).

Pfeiffer et al. untersuchten im Rahmen einer kontinuierlichen Radbelastung über 180 min mit 59% der $VO_{2max}$ die Oxidation exogener KH in Form von GEL und LIQ, die sich ähnlich verhielt wie in der vorliegenden Arbeit (Pfeiffer, Stellingwerff et al. 2010). Es handelte sich dabei um eine Mischung von Glukose und Fruktose, die im Verhältnis 2:1 verabreicht wurden. Beide, sowohl die semisolide als auch die flüssige Ernährungsstrategie, zeigten bei einer Substratzufuhr von 1,8 g/min, einen ähnlichen Verlauf in der Oxidationsrate ($p = 0,40$) und Oxidationseffizienz ($p = 0,36$). In unserer Arbeit zeigten der RQ ($p = 0,78$) sowie die Blutglukose ($p = 0,22$) als Marker für die Resorption bzw. Oxidation von KH zu keinem Zeitpunkt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den beiden Behandlungsgruppen. Am Ende der Laufbelastung ergab sich ein Trend für eine niedrigere Blutglukosekonzentration während LIQ. Dies erklärt sich durch einen niedrigeren KH-Konsum beim abschließenden Lauf während LIQ ($54\ g \cdot h^{-1}$) im Vergleich zu GEL ($81\ g \cdot h^{-1}$). Der Grund hierfür war, dass die Teilnehmer Schwierigkeiten hatten, während der intensiven Laufbelastung das komplette Flüssigkeitsvolumen zu konsumieren. Dies stellt auch einen potentiellen Nachteil der LIQ-Strategie dar. Im Besonderen während dem abschließendem Lauf bei Ironman Wettkämpfen, welcher zumindest 2,5 h dauert, kann dies zu einer Hypoglykämie und konsekutiv zu einem Leistungseinbruch führen.

## 4.3 Hydratation

Besteht ein Ungleichgewicht zwischen der Flüssigkeitsaufnahme und dem Flüssigkeitsverlust, hat dies über einen längeren Zeitraum bei sportlicher Belastung eine Dehydratation zur Folge. Dies kann zu einem Leistungsabfall bis hin zum Abbruch der Belastung führen (Sawka, Burke et al. 2007). Nur über eine ausreichende

Flüssigkeitszufuhr (Hydratation) kann ein solches Szenario verhindert werden. Eine rezent erschienene Meta-Analyse beschreibt, dass Flüssigkeitsverluste bis zu 4% des Körpergewichts keinen Einfluss auf die körperliche Leistungsfähigkeit haben (Goulet 2013). Um eine unzureichende Flüssigkeitszufuhr zu vermeiden, wurde im Rahmen der vorbereitenden Untersuchungen eine kontinuierliche Radbelastung bei 90% der VT1 zur Beurteilung der Schweißrate durch Berechnung der Differenz des Körpergewichts vor und nach dem einstündigen Test durchgeführt (Sareban, Zugel et al. 2016). So konnte ein Einfluss durch Dehydratation auf die zu prüfenden Interventionen vermieden werden. Der Körpergewichtsverlust wurde entsprechend der Formel aus dem Kapitel 2.7 berechnet und dokumentiert. Die Flüssigkeitszufuhr während des gesamten Belastungsprotokolls war jedoch bei GEL (3,9 ± 0,54 l / 0,78 ± 0,11 ml · h-1) im Vergleich zu LIQ (4,2 ± 0,25 l / 0,84 ± 0,5 ml · h-1) tendenziell geringer (p = 0,10), obwohl die Probanden vom Studienpersonal aufgefordert wurden, die berechneten Schweißverluste zu kompensieren und somit der Flüssigkeitsmenge unter LIQ anzupassen. Der durchschnittliche Gewichtsverlust war bei beiden Untersuchungen unter 2% und entspricht somit auch den strengeren Empfehlungen der amerikanischen Fachgesellschaft für Sportmedizin (Sareban, Zugel et al. 2016; Sawka, Burke et al. 2007).

Ob eine geringere Flüssigkeitszufuhr während einer GEL-Ernährungsstrategie bei längeren Belastungsdauern wie während einer Marathondistanz beim Ironman zu einer Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit führt, kann anhand dieser Arbeit nicht beantwortet werden.

## 4.4 Gastrointestinale Toleranz

Rehrer et al. beschrieben eine erhöhte Prävalenz von GI Beschwerden während Ausdauerbelastungen bei Konsum von hochkonzentrierten KH-Lösungen, wie es Gelprodukte darstellen (Rehrer, van Kemenade et al. 1992). 40 % der Teilnehmer klagten über GI Beschwerden während dem Konsum einer hypertonischen Flüssigkeit, nur 10% klagten über vergleichbare Beschwerden bei einer isotonischen Flüssigkeitszufuhr.

63% der Teilnehmer in der vorliegenden Studie klagten über GI Beschwerden während der GEL-Strategie, während jeder einzelne Teilnehmer LIQ gut tolerierte (Sareban, Zugel et al. 2016). Die angegebenen Beschwerden beinhalteten Blähungen, Völlegefühl und Stuhldrang und sind typische Beschwerden in Ausdauersportarten (Brouns, Saris et al.

1987). Dieses Ergebnis deckt sich mit anderen Studien, die bereits eine höhere Prävalenz von GI Beschwerden während Halbmarathonbelastungen bei GEL im Vergleich zu reinem Wasser (Burke, Wood et al. 2005) beschreiben konnten. Pfeiffer et al. konnten im Laufsport eine Prävalenz von GI Beschwerden von 3-23% dokumentieren (Pfeiffer, Cotterill et al. 2009) und diese sind allgemein die Hauptursache für Rennabbrüche in Ausdauersportarten (Jeukendrup, Vet-Joop et al. 2000). Die geringere Flüssigkeitszufuhr während GEL ist eine mögliche Erklärung für die häufigeren GI-Beschwerden in der vorliegenden Arbeit und unterstreicht die notwendige Hydratation bei einer GEL-Ernährungsstrategie (Sareban, Zugel et al. 2016). Da SELIN den Konsum von Makronährstoffen auf KH beschränkt, können andere Diät-assoziierten Gründe für GI Beschwerden während den Untersuchungen wie Ballaststoff- Fett- und Proteingehalt ausgeschlossen werden (Rehrer, van Kemenade et al. 1992).

## 4.5 Wirtschaftliche Faktoren

Die Kosten für die GEL-Strategie (4,5 € / h) waren in dieser Arbeit etwa sechsmal so hoch wie für LIQ (0,75 € / h). Es empfiehlt sich, die unterschiedlichen Ernährungsstrategien für Ausdauersportarten auch im Training zu untersuchen, weil die entstehenden Gesamtkosten wesentlich höher liegen könnten und nicht unterschätzt werden sollten. Besonders für Sportler im Amateurbereich könnte eine GEL-Strategie eine erhebliche wirtschaftliche Zusatzbelastung darstellen (Sareban, Zugel et al. 2016).

## 4.6 Nahrungsergänzungsmittel und Doping

Verbotene Substanzen verunreinigter Nahrungsergänzungsmittel können unbeabsichtigt zu einem positiven Dopingtest führen (Judkins and Prock 2012). Judkins et al. beschrieben eine in vielen Sportarten zur Gewohnheit gewordenen Anwendung von Nahrungsergänzungsmitteln. Viele solcher über das Internet und im Einzelhandel erhältlichen Supplemente sind mit Steroiden und Stimulantien verunreinigt (Judkins and Prock 2012). Nur ein gut kontrolliertes Nahrungsergänzungsmittel ist somit die Voraussetzung für dessen Konsum. Schon aus diesem Grund würde eine eigene Zubereitung aus besser kontrollierbaren Bestandteilen das Risiko einer Verunreinigung durch Dopingsubstanzen minimieren. Andererseits kann eine LIQ Zubereitung, egal ob absichtlich oder unbewusst, besonders in größeren Teams und Trainingslagern bei dem

zahlreiche Personen Zugriff auf Inhaltsstoffe haben, eine noch größere Gefahr der Kontamination darstellen. Das Risiko muss deshalb individuell vom Sportler sowie den Betreuern abgeschätzt werden.

## 4.7 Limitationen

Die Dauer der Rad- (180 min) bzw. Laufbelastung (60 min) war kürzer als bei einem klassischen Ironman. Ein ergogener Vorteil einer der beiden Ernährungsstrategien bei einer längeren Rad- bzw. Laufbelastung ist möglich. Auf der anderen Seite besteht die Eventualität, dass bei einer längeren Laufbelastung ein konservatives Tempo perspektivische Vorteile einer der beiden Ernährungsstrategien abschwächt (Sareban, Zugel et al. 2016).

Die Studie war weder verblindet noch plazebokontrolliert. Eine Verblindung war aufgrund der unterschiedlichen Konsistenzen der beiden Produkte nicht möglich. Zahlreiche plazebokontrollierte Studien konnten bereits den ergogenen Vorteil einer exogenen KH Zufuhr während Ausdauerbelastungen nachweisen (Jeukendrup 2011), so dass in dieser Arbeit aus Gründen der Praktikabilität und Reduktion der Gesamtbelastung für die Teilnehmer auf eine Kontrollgruppe verzichtet wurde (Sareban, Zugel et al. 2016).

# 5 Zusammenfassung

Ausdauerbelastungen führen zur Abnahme des Glukosegehalts im Blut sowie einer Glykogenverarmung im Muskel. Die Folge ist ein Leistungsverlust, da der arbeitenden Muskulatur nicht ausreichend Substrat zur Verfügung steht, um die benötigte Energie bereitzustellen. Dieser Leistungsverlust lässt sich über die Zufuhr exogener Kohlenhydrate vermeiden. Üblich ist dabei die orale Verabreichung in flüssiger, semisolider oder fester Form. Daten aus dem Radsport zeigen, dass die hochkonzentrierte semisolide Gel-Form unter den Athleten bevorzugt wird. Auch im Triathlon mit den Disziplinen Schwimmen, Radfahren und Laufen, wird das Gel präferiert. Frühere Studien, die den Einfluss unterschiedlicher Kohlenhydratträger auf die körperliche Leistungsfähigkeit bei Ausdauerbelastungen untersucht haben, sind nur eingeschränkt auf den Triathlonsport übertragbar.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Wahl, exogene Kohlenhydrate als kommerziell erhältliches Gel (GEL) oder in Form einer flüssigen Kohlenhydratlösung (LIQ) entsprechend aktueller Empfehlungen von Menge und Zusammensetzung zu konsumieren, in einem simulierten Langstrecken-Triathlon keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat. Eine Tendenz zur Hypoglykämie macht sich bei LIQ jedoch im abschließenden Lauf bemerkbar. Zusätzlich bestätigt diese Arbeit bereits existierende Erkenntnisse, dass der Gebrauch von GEL mit einer deutlich erhöhten Prävalenz gastrointestinaler Beschwerden einhergeht. Ein Kostenvergleich ergab einen sechsfach erhöhten finanziellen Aufwand bei GEL gegenüber LIQ.

Sportler und Betreuer sollten die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Ernährungsstrategien während Langdistanz-Triathlonwettkämpfen sorgfältig und individuell abwägen.

Die Studie wurde im April 2016 im International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism veröffentlicht (Sareban, Zugel et al. 2016).

# 6 Literaturverzeichnis


1. Ahlborg, G. and Felig, P. (1976). "Influence of glucose ingestion on fuel-hormone response during prolonged exercise." J Appl Physiol **41**: 683-688.
2. Anderson, T. (1996). "Biomechanics and running economy." Sports Med **22**: 76-89.
3. Beaver, W. L., Wasserman, K. and Whipp, B. J. (1986). "A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange." J Appl Physiol (1985) **60**: 2020-2027.
4. Bjorkman, O., Sahlin, K., Hagenfeldt, L. and Wahren, J. (1984). "Influence of glucose and fructose ingestion on the capacity for long-term exercise in well-trained men." Clin Physiol **4**: 483-494.
5. Borg, G. A. (1974). "Perceived exertion." Exerc Sport Sci Rev **2**: 131-153.
6. Broad, E. M. and Rye, L. A. (2015). "Do current sports nutrition guidelines conflict with good oral health?" Gen Dent **63**: 18-23.
7. Brouns, F., Saris, W. H. and Rehrer, N. J. (1987). "Abdominal complaints and gastrointestinal function during long-lasting exercise." Int J Sports Med **8**: 175-189.
8. Burke, L. M., Wood, C., Pyne, D. B., Telford, D. R. and Saunders, P. U. (2005). "Effect of carbohydrate intake on half-marathon performance of well-trained runners." Int J Sport Nutr Exerc Metab **15**: 573-589.
9. Campbell, C., Prince, D., Braun, M., Applegate, E. and Casazza, G. A. (2008). "Carbohydrate-supplement form and exercise performance." Int J Sport Nutr Exerc Metab **18**: 179-190.
10. Coggan, A. R. and Coyle, E. F. (1991). "Carbohydrate ingestion during prolonged exercise: effects on metabolism and performance." Exerc Sport Sci Rev **19**: 1-40.
11. Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hemmert, M. K. and Ivy, J. L. (1986). "Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate." J Appl Physiol (1985) **61**: 165-172.
12. Currell, K. and Jeukendrup, A. E. (2008). "Superior endurance performance with ingestion of multiple transportable carbohydrates." Med Sci Sports Exerc **40**: 275-281.
13. De Bock, K., Derave, W., Ramaekers, M., Richter, E. A. and Hespel, P. (2007). "Fiber type-specific muscle glycogen sparing due to carbohydrate intake before and during exercise." J Appl Physiol (1985) **102**: 183-188.
14. EBIO®plus (2000). Technische Beschreibung, Messprinzip. Eppendorf, 22331 Hamburg, Germany. **2.1:** 2.
15. Gollnick, P. D., Piehl, K. and Saltin, B. (1974). "Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates." J Physiol **241**: 45-57.
16. Goulet, E. D. (2013). "Effect of exercise-induced dehydration on endurance performance: evaluating the impact of exercise protocols on outcomes using a meta-analytic procedure." Br J Sports Med **47**: 679-686.
17. Hausswirth, C. and Lehenaff, D. (2001). "Physiological demands of running during long distance runs and triathlons." Sports Med **31**: 679-689.
18. Havemann, L. and Goedecke, J. H. (2008). "Nutritional practices of male cyclists before and during an ultraendurance event." Int J Sport Nutr Exerc Metab **18**: 551-566.
19. Jackson, A. S. and Pollock, M. L. (1978). "Generalized equations for predicting body density of men." Br J Nutr **40**: 497-504.

20. Jentjens, R. L., Moseley, L., Waring, R. H., Harding, L. K. and Jeukendrup, A. E. (2004). "Oxidation of combined ingestion of glucose and fructose during exercise." J Appl Physiol (1985) **96**: 1277-1284.
21. Jeukendrup, A. (2013). "Multiple transportable carbohydrates and their benefits." Sports Science Exchange **26**: 1-5.
22. Jeukendrup, A. and Gleeson, M. (2010). Sport Nutrition. IL USA, Human Kinetics.
23. Jeukendrup, A. E. (2011). "Nutrition for endurance sports: marathon, triathlon, and road cycling." J Sports Sci **29 Suppl 1**: S91-99.
24. Jeukendrup, A. E., Vet-Joop, K., Sturk, A., Stegen, J. H., Senden, J., Saris, W. H. and Wagenmakers, A. J. (2000). "Relationship between gastro-intestinal complaints and endotoxaemia, cytokine release and the acute-phase reaction during and after a long-distance triathlon in highly trained men." Clin Sci (Lond) **98**: 47-55.
25. Judkins, C. and Prock, P. (2012). "Supplements and inadvertent doping - how big is the risk to athletes." Med Sport Sci **59**: 143-152.
26. Lane, A. M., Devonport, T. J., Friesen, A. P., Beedie, C. J., Fullerton, C. L. and Stanley, D. M. (2016). "How should I regulate my emotions if I want to run faster?" Eur J Sport Sci **16**: 465-472.
27. Meyer, J. H., Gu, Y. G., Jehn, D. and Taylor, I. L. (1988). "Intragastric vs intraintestinal viscous polymers and glucose tolerance after liquid meals of glucose." Am J Clin Nutr **48**: 260-266.
28. Pfeiffer, B., Cotterill, A., Grathwohl, D., Stellingwerff, T. and Jeukendrup, A. E. (2009). "The effect of carbohydrate gels on gastrointestinal tolerance during a 16-km run." Int J Sport Nutr Exerc Metab **19**: 485-503.
29. Pfeiffer, B., Stellingwerff, T., Zaltas, E. and Jeukendrup, A. E. (2010). "CHO oxidation from a CHO gel compared with a drink during exercise." Med Sci Sports Exerc **42**: 2038-2045.
30. Rehrer, N. J., van Kemenade, M., Meester, W., Brouns, F. and Saris, W. H. (1992). "Gastrointestinal complaints in relation to dietary intake in triathletes." Int J Sport Nutr **2**: 48-59.
31. Rodriguez, N. R., Di Marco, N. M. and Langley, S. (2009). "American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance." Med Sci Sports Exerc **41**: 709-731.
32. Sareban, M., Zugel, D., Koehler, K., Hartveg, P., Zugel, M., Schumann, U., Steinacker, J. M. and Treff, G. (2016). "Carbohydrate Intake in Form of Gel Is Associated With Increased Gastrointestinal Distress but Not With Performance Differences Compared With Liquid Carbohydrate Ingestion During Simulated Long-Distance Triathlon." Int J Sport Nutr Exerc Metab **26**: 114-122.
33. Sarzynski, M. A., Ghosh, S. and Bouchard, C. (2016). "Genomic and transcriptomic predictors of response levels to endurance exercise training." J Physiol.
34. Sawka, M. N., Burke, L. M., Eichner, E. R., Maughan, R. J., Montain, S. J. and Stachenfeld, N. S. (2007). "American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement." Med Sci Sports Exerc **39**: 377-390.
35. Smith, J. W., Pascoe, D. D., Passe, D. H., Ruby, B. C., Stewart, L. K., Baker, L. B. and Zachwieja, J. J. (2013). "Curvilinear dose-response relationship of carbohydrate (0-120 g.h(-1)) and performance." Med Sci Sports Exerc **45**: 336-341.
36. Stellingwerff, T. and Jeukendrup, A. E. (2011). "Don't forget the gut--it is an important athletic organ!" J Appl Physiol (1985) **110**: 278; discussion 294.

37. Temesi, J., Johnson, N. A., Raymond, J., Burdon, C. A. and O'Connor, H. T. (2011). "Carbohydrate ingestion during endurance exercise improves performance in adults." J Nutr **141**: 890-897.
38. Wasserman, K., Whipp, B. J., Koyl, S. N. and Beaver, W. L. (1973). "Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise." J Appl Physiol **35**: 236-243.
39. Wellek, S. and Blettner, M. (2012). "On the proper use of the crossover design in clinical trials: part 18 of a series on evaluation of scientific publications." Dtsch Arztebl Int **109**: 276-281.

# Danksagung

Die Danksagung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

# Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

# Publikationen

Zügel, D., Johannes, M., Udart, M., Luthardt, R. und Rudolph, H. (2016). “Oberflächenmikrostrukturierung von zweiteiligen Dentalimplantaten aus oxidischer Dispersionskeramik durch direkte Formgebung.“ Posterwettbewerb: DGZMK / BZÄK / 30. Dentsply Sirona Förderpreis 2016.

Zügel, D., Luthardt, R., Graf, M. und Rudolph, H. (2016). “Abformung – konventionell versus digital.“ Zahnmedizin up2date 2016; 10(04): 359-380.

Sareban, M., Zugel, D., Koehler, K., Hartveg, P., Zugel, M., Schumann, U., Steinacker, J. M. and Treff, G. (2016). "Carbohydrate Intake in Form of Gel Is Associated With Increased Gastrointestinal Distress but Not With Performance Differences Compared With Liquid Carbohydrate Ingestion During Simulated Long-Distance Triathlon." Int J Sport Nutr Exerc Metab **26**: 114-122.