

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Fakultät für Psychologie und Bewegungswissenschaft  
Institut für Bewegungswissenschaft  
Arbeitsbereich für Sport- und Bewegungsmedizin

Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann

**Auswirkungen einer kontinuierlichen Steigerung des Trainingsanteils in  
minimalistischen Laufschuhen auf die Laufökonomie:  
Eine randomisiert kontrollierte Studie**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin an  
der medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

Vorgelegt von:  
Katharina Berenice Lindlein  
aus Karlsruhe

Hamburg 2018

Angenommen von der medizinischen Fakultät der  
Universität Hamburg am:

Veröffentlicht mit Genehmigung der medizinischen Fakultät der  
Universität Hamburg.

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Prof. Dr. Klaus-Michael Braumann

Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter: Prof. Dr. Klaus Püschel

Prüfungsausschuss, dritter Gutachter: PD. Dr. Jun Oh

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Publikation im „Journal of Science and Medicine in Sport“	1
2 Zusammenfassende Darstellung der Publikation	7
2.1 Einleitung	7
2.2 Material und Methoden	8
2.3 Ergebnisse	10
2.4 Diskussion	11
2.5 Ausblick	13
2.6 Literaturverzeichnis	15
3 Kurzfassung der Publikation	
3.1 in deutscher Sprache	17
3.2 in englischer Sprache	18
4 Erklärung des Eigenanteils	18
5 Danksagung	20
6 Lebenslauf	21
7 Eidesstattliche Erklärung	23



## Original research

## Improving Running Economy by Transitioning to Minimalist Footwear: A Randomised Controlled Trial

K. Lindlein<sup>a,b</sup>, A. Zech<sup>c</sup>, A. Zoch<sup>d</sup>, K.-M. Braumann<sup>a</sup>, K. Hollander<sup>a,e,\*</sup><sup>a</sup> Department of Sports and Exercise Medicine, Institute of Human Movement Science, University of Hamburg, Germany<sup>b</sup> Department of Cardiology, Internal Medicine I, Helios Albert-Schweitzer-Hospital, Germany<sup>c</sup> Institute of Sports Science, Friedrich Schiller University of Jena, Germany<sup>d</sup> Department of Economics, University of Mannheim, Germany<sup>e</sup> Department of Sports and Rehabilitation Medicine, BG Trauma Hospital of Hamburg, Germany

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 19 September 2017

Received in revised form 19 April 2018

Accepted 9 May 2018

Available online 26 May 2018

## Keywords:

Exercise physiology

Shoes

Exercise test

VO<sub>2</sub>max

Oxygen consumption

## ABSTRACT

**Objectives:** Ongoing debates about benefits and risks of barefoot- and minimally-shod running have, to date, revealed no conclusive findings for long-term effects on physical performance. The purpose of this study was to examine the effects of an 8-week transition to minimalist footwear (MFW) on running economy (RE).

**Design:** Randomised controlled trial.

**Methods:** Thirty-two male, habitually-shod runners were assigned randomly to an 8-week training intervention either in minimalist (=intervention group) or conventional running shoes (=control group). The intervention consisted of a gradual increase in use of the new footwear by 5% of the individual weekly distance. Before and after the intervention, a VO<sub>2</sub>max test was followed by a submaximal RE test at 70% and 80% of vVO<sub>2</sub>max in both shoe conditions 7 days later. RE was measured at the submaximal tests and expressed as caloric unit cost (kcal kg<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>) and oxygen consumption (ml kg<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>).

**Results:** RE improved in the intervention group over time compared to the control group with small to moderate effect sizes (ES) in both shoe conditions: Effects on RE (kcal kg<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>) in conventional running shoes: ES vVO<sub>2</sub>70%: 0.68 (95% CI: -0.14 to 1.51), ES vVO<sub>2</sub>80%: 0.78 (95% CI: 0–1.56). In minimalist footwear: ES vVO<sub>2</sub>70%: 0.3 (95% CI: -0.54 to 1.14), ES vVO<sub>2</sub>80%: 0.42 (95% CI: -0.41 to 1.25). These effects were not statistically significant (p > 0.05). The repeated-measures ANOVA also showed no group by time interactions for all submaximal RE testing conditions (p > 0.05).

**Conclusions:** Although not reaching statistical significance, training in MFW compared to CRS resulted in small to moderate improvements in RE.

© 2018 Sports Medicine Australia. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Running economy (RE) is an important factor in elite performance<sup>1</sup> and a good predictor of running performance.<sup>2</sup> Per definition, runners with a good RE use less energy to sustain the same running velocity than those with a poor RE.<sup>3</sup>

Evidence shows that RE is influenced by biomechanics and footwear.<sup>4</sup> While the relationship between running biomechanics and RE has long been a research focus,<sup>5</sup> the interest on the effects of minimalist footwear (MFW) on RE<sup>6–8</sup> and running biomechanics has increased over the last decade.<sup>9–11</sup>

At first, short-term effects of MFW were described in cross-sectional studies.<sup>12–14</sup> For example, Squadrone and Gallozzi<sup>12</sup> showed that runners in MFW used less oxygen than runners in conventional running shoes (CRS), a finding which was confirmed by other studies.<sup>13,14</sup> Recent studies have begun to focus more on long-term effects of habitual or inexperienced barefoot/MFW running, yet have reported conflicting findings about running performance and RE.<sup>9,15,18</sup> Long-term effects were first investigated in an intervention study by Warne and Warrington,<sup>16</sup> in which RE improved after 4 weeks of training in MFW compared to CRS. Another study also showed an improvement in RE and running performance after 6 weeks of training in MFW compared to CRS.<sup>17</sup> In contrast, longer training phases over 10 weeks with free training sessions in MFW<sup>15</sup> or 8 weeks including gait retraining in MFW<sup>9</sup> did not result in significant improvements of RE. The effects of MFW on running

\* Corresponding author.

E-mail address: [karsten.hollander@uni-hamburg.de](mailto:karsten.hollander@uni-hamburg.de) (K. Hollander).

biomechanics have received more research attention and include increased stride frequency and longitudinal arch stiffness, as well as reduced vertical oscillation of the centre of mass.<sup>10,11,16</sup> These findings have led to the hypothesis that, in some studies, MFW benefits would be reflected in the alteration of biomechanics in a manner that might lead to favourable effects on RE.<sup>10,11,16</sup>

Thus, the current research demonstrates inconsistent results and the few interventional studies with inexperienced MFW runners do not give clear, guiding evidence.<sup>6</sup> The exposure of transitioning to MFW was described as critically important and a transition period of 4–8 weeks for general muscular adaptation was suggested.<sup>19</sup> In line with this recommendation, our study investigated a structured transition to MFW on RE, extending the transitional phase to 8 weeks. Our hypothesis was that RE in the intervention group would show greater improvements after 8 weeks of training in MFW than a control group training in CRS.

## 2. Methods

This was a randomised controlled study following the CONSORT statement for reporting randomised trials.<sup>20</sup> Over 8 weeks, the intervention group performed a transition to MFW (Leguano aktiv, LEGUANO, St. Augustin, Germany, 0 mm heel drop, no arch support, 220 g for US size 9, minimalist index score = 88%<sup>21</sup>), while the control group performed the same transition protocol in CRS (ASICS, Kobe, Japan, Asics cumulus 17, 10 mm heel drop, neutral (no) arch support, 336 g for US size 9, minimalist index score = 12%). The study comprised two pre-tests followed by an 8-week transition phase with a progressive increase of training in the new footwear, and two post-tests. Pre- and post-tests were identical and included the same measurement. All participants visited the university's exercise physiology laboratory four times. The first measurement was a maximal oxygen consumption test ( $\text{VO}_2\text{max}$  test). The second measurement followed seven days later comprising a  $\text{VO}_2\text{submaximal}$  test in two different shoe conditions (MFW and CRS) for both groups. The randomisation into an intervention and a control group took place prior to the first testing. The sample size was determined by a power analysis for a 2-mean sample and 2-sided equality with the standard deviation of  $\text{VO}_2\text{submax}$  values as our outcome variable and a significance level of 0.05. The expected effect size (ES) was 1.4 units at a mean of 45  $\text{VO}_2\text{submax}$  values and a standard deviation of 2, figures were based on a previous study.<sup>12</sup> Since the power calculation determined a sample size of 32, the respective group size was set to 16 participants per treatment arm. A stratified randomisation was used to obtain an intervention and control group balanced regarding all variables observed at recruitment (age, BMI,  $\text{VO}_2\text{max}$ , km per week, self-assessed 10 km performance). Each participant completed the submaximal test in CRS as well as in MFW in a randomised order. All participants completed the  $\text{VO}_2\text{max}$  test in the new standardized CRS.

The local ethics committee approved this study (ID 47). The study was registered retrospectively as DRKS00011076 on the German Clinical Trials Register. It was carried out in accordance with the Helsinki Declaration guidelines. Prior to it, all participants were informed about content, course and duration of the study and gave their written, informed consent.

We recruited through advertisements in local running stores a total of 32 male recreational runners experienced in long distance running events ( $\geq 10$  km), including only athletes that were between 20–60 years old, ran more than 3 h per week, and had completed a 10 km run under 50 min in the past 6 months. Participants with lower extremity injuries within the 3 months prior to the study or any previous barefoot/MFW running experience were excluded. All participants refrained from eating, caffeine and alco-

hol 2 h before the tests or performing exhausting exercise 24 h prior to it.

At the first appointment, participants completed a  $\text{VO}_2\text{max}$  test. Prior to it, height and body mass were measured, and participants filled out a questionnaire about their past injuries, weekly running time and mileage. In all 4 tests ( $\text{VO}_2\text{max}$  and  $\text{VO}_2\text{submax}$  tests), gas exchange data were collected continuously using a breath-by-breath system (Quark CPET COSMED, Rome, Italy). The system calibrated automatically the gas analyser using reference oxygen and carbon dioxide gases. Volume calibration of the flow volume measurement was performed by a 3-l calibration syringe before each test (3-L calibration syringe, COSMED, Rome, Italy).

The  $\text{VO}_2\text{max}$  test (1<sup>st</sup> test) was conducted through a ramp test protocol on a treadmill (T 200 COSMED, Rome, Italy). The participants started with a 5-min warm-up at 5 km/h and a 2% incline, followed directly by a gradual speed increase to 8 km/h. The speed was subsequently increased every 3 min by 2 km/h until the participants' self-determined cessation. Starting at the 8 km/h stage, a 30-s break was introduced after every speed stage. Heart rate was recorded 30 s before the end of each stage.  $\text{VO}_2\text{max}$  was defined as the highest mean value achieved over a span of 60 s.  $\text{vVO}_2\text{max}$  was defined as the speed at the highest  $\text{VO}_2\text{max}$  value. Seven days after the  $\text{VO}_2\text{max}$  tests, a RE  $\text{VO}_2\text{submax}$  test in CRS and MFW was conducted on the same treadmill (2nd test). Gas system calibration was the same as in the  $\text{VO}_2\text{max}$  test.

In each group, 8 participants began their submaximal tests with CRS; the other 8 started with MFW (random allocation). The RE protocol started with a 3-min warm-up at 5 km/h followed by three 5-min runs at 70%, then 80% and finally 90% of the  $\text{vVO}_2\text{max}$  (=70/80/90% $\text{vVO}_2\text{max}$ ) on the treadmill with a 1% incline. Each of the 3 speed levels were separated by a 2-minute break. Unlike the maximum test, we used a 1% incline in the submaximal test based on other study designs.<sup>9,16</sup>

Exhaled gas was collected over 5 min at 70%, 80% and finally 90% while the last minute of each collection sample was used to determine running economy. This collection sample was normalized for the evaluation of RE by a physiological steady state over a fixed distance and was expressed as caloric unit costs ( $\text{kcal kg}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ) and oxygen consumption ( $\text{ml kg}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ).<sup>22</sup> Caloric unit cost is known as a more sensitive expression for RE, especially to changes in speed.<sup>22,23</sup> Therefore, it was used as the primary outcome. The steady-state condition was checked by respiratory exchange ratio (RER). The protocol for the  $\text{VO}_2\text{submax}$  test was conducted individually depending on the individual  $\text{VO}_2\text{max}$  tests performance. Participants were given a 20-min recovery between the trials in the different shoes.

After the second appointment, participants started an 8-week training phase. Depending on the randomized assignment described above, they were either issued a pair of CRS or MFW and received a running diary and a running training plan specifying the weekly percentage of running time in the respective new footwear. This running time was calculated from the information of weekly running distance and duration submitted in the initial questionnaire. All participants were instructed to continue their regular running training routine and not to begin or add a new training. The study design provided a weekly continuous increase of the proportion of time spent running in CRS or MFW. This time span was designed to be part of their habitual training routine and was not added on top of the usual routine but rather replaced part of it gradually. The first week started with an acclimatisation period of  $3 \times 10$  min of walking in the new footwear (CRS or MFW) distributed over 3 separate days. Subsequently, the new footwear was used with a weekly progressive 5% increase within the weekly running time. In the last week of the intervention phase, all participants ran 35% of their weekly running time in either the CRS or MFW. At post-tests all participants were tested identically to

the pre-tests. We adjusted the submaximal velocity for the post-interventional RE measurement calculated on the  $vVO_2$ max during the post-interventional  $VO_2$ max test.

To investigate the interventional effects, the differences in RE over time between the intervention and control group were calculated with repeated-measures ANOVA. The structure of the ANOVA was: group (control and intervention group) and time (pre to post). Statistical analyses were performed using the statistical software Stata (version 14.2). Statistical significance was accepted at  $\alpha \leq 0.05$ .

Effect sizes (ES) were calculated as a ratio between the difference in the mean change values of the two different groups and the pooled SD at baseline for all participants and were interpreted as trivial <0.2; small 0.2–0.6; moderate 0.6–1.2; and large >1.2.<sup>24,25</sup>

### 3. Results

The sample demographics of all participants ( $n=32$ ) were (mean  $\pm$  SD): age ( $38.3 \pm 8.5$  years), height ( $178 \pm 5.1$  cm), body mass ( $78.2 \pm 11.2$  kg), BMI ( $24.34 \pm 2.9$  kg/m<sup>2</sup>) and weekly running distance ( $53.1 \pm 29.8$  km). An overview of the descriptive statistics for the treatment and control group can be found in Table 1.

A total of 7 participants dropped out (5 runners from the control, 2 from the intervention group). All drop-outs from the control and one from the intervention group were due to injuries or illnesses unrelated to the study. One participant (intervention group) had a plantar fasciitis possibly related to the study's intervention. Therefore, the final intervention analysis was based on 25 participants who attended pre- and post-assessment. See Fig. 1 for the flow of participants.

All participants achieved steady-state condition with RER below 1.00 at 70% and 80% of  $vVO_2$ max. The RER at the steady state oxygen uptake at 90% of  $vVO_2$ max was on average  $\geq 1.00$ . This was the reason why we excluded the data from the analysis.

RE measured as caloric unit costs (kcal kg<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>) showed a small to moderate improvement in the intervention group over time while running in both shoe conditions. In CRS: ES  $vVO_2$ 70% 0.68; 95% CI: -0.14 to 1.51, ES  $vVO_2$ 80%: 0.78; 95% CI: 0–1.56. In MFW: ES  $vVO_2$ 70%: 0.3; 95% CI: -0.54 to 1.14, ES  $vVO_2$ 80%: 0.42; 95% CI: -0.41 to 1.25.

However, the repeated measures ANOVA showed no significant group by time interactions in RE between control and intervention group in any of the shoe or velocity conditions ( $p \geq 0.05$ ). See Table 2 for all RE results, ES and group by time interactions.

### 4. Discussion

The main finding of this study was that a weekly gradual increase in the proportion of training conducted in MFW over 8 weeks resulted in small to moderate, but not statistically significant, improvements in RE. These results conform with other long-term studies showing significant improvement in RE over time.<sup>15–17</sup> Only one study, focussing on a gait-retraining, showed no significant effect of MFW on RE.<sup>9</sup>

Our results showed that the intervention group improved their RE during the intervention phase. While we initially only expected an improvement in MFW conditions, the moderate effect in CRS conditions was unexpected. This improvement may result from training in MFW and could reflect a possible transfer effect on RE in CRS. Our results are in agreement with previously published results of Ridge et al.<sup>15</sup> showing no significant interaction effects on RE after a longer transition period (10 weeks) to MFW but demonstrating an improvement of RE in both shoe conditions in the intervention group. Ridge et al.<sup>15</sup> explained these results mainly with an adaptation to testing. In our study, an additional

**Table 1**  
Descriptive characteristics of the study population and test velocities.

	Age (years)	Stature (cm)	Body mass (kg)	Weekly mileage (km)	$VO_2$ max pre (ml min <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	$VO_2$ max post (ml min <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	$vVO_2$ max pre (km/h)	$vVO_2$ max post (km/h)	$vVO_2$ 70% pre (km/h)	$vVO_2$ 70% post (km/h)	$vVO_2$ 80% pre (km/h)	$vVO_2$ 80% post (km/h)	$vVO_2$ 90% pre (km/h)	$vVO_2$ 90% post (km/h)
Control group	38.43 (8.9)	180.56 (5.5)	81.3 (10.4)	55.0 (18.4)	54.96 (8.79)	55.78 (5.65)	15.22 (1.91)	14.61 (1.86)	10.72 (1.26)	10.26 (1.36)	12.24 (1.44)	11.78 (1.48)	13.78 (1.62)	13.25 (1.38)
Intervention group	38.18 (8.4)	177.31 (4.4)	75.1 (11.2)	50.6 (20.4)	53.83 (7.9)	54.73 (4.7)	15.44 (1.14)	15.79 (1.31)	10.82 (0.8)	11.05 (0.91)	12.36 (0.9)	12.64 (1.04)	13.9 (1.03)	14.21 (1.18)

Data presented as mean and SD.

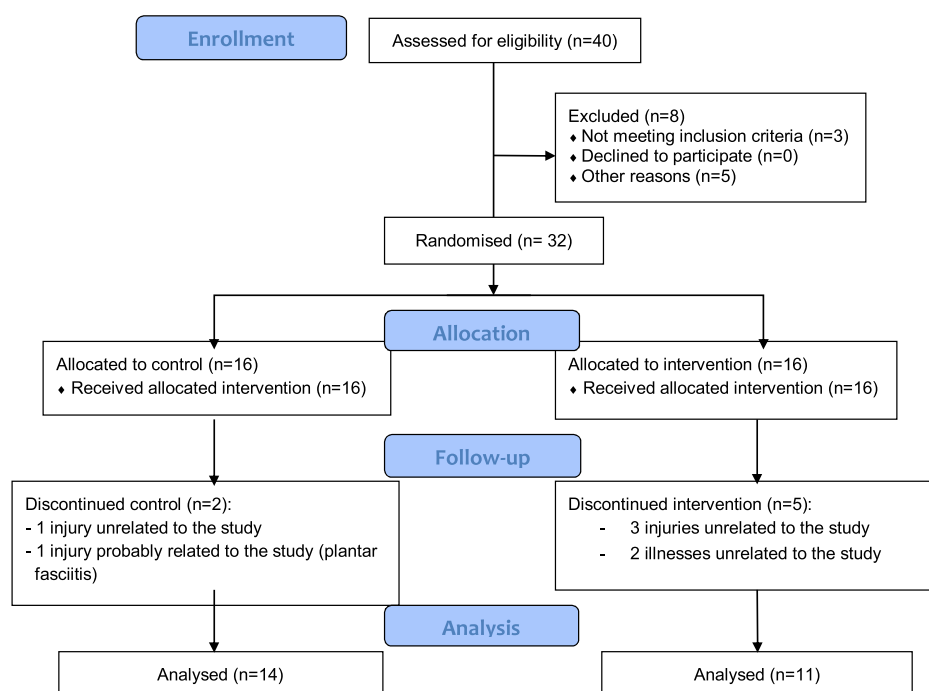


Fig. 1. CONSORT flow diagram.

post-intervention  $\text{VO}_2\text{max}$  test was carried out to account for potential performance improvements over time, and the velocity for the post RE measurement was adjusted accordingly. Therefore, the velocity in the  $\text{VO}_2\text{max}$  and  $\text{VO}_2\text{submax}$  testing from pre to post test was faster in the intervention group compared to the control group. Since an increase in running speed may also influence  $\text{VO}_2$  measurements,<sup>26</sup> we calculated RE as caloric unit costs ( $\text{kcal kg}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ) and oxygen consumption per running distance (km) and not per minute.<sup>22</sup> The effects in the intervention group for RE during the CRS running condition are in agreement with Warne and Warrington<sup>16</sup> who also showed a 2.32% improvement of RE between pre and post test in CRS after training in MFW. Furthermore, the observed improvements in RE during CRS might be related to changes in running style resulting from the MFW training. Several studies<sup>10,11,16,27</sup> found significant effects of training in MFW on biomechanics. It is possible that these changes, in turn, transferred to technical running changes in CRS and thus resulted in reduced oxygen consumption. This leaves room for interpretation that MFW training should not replace but complement training in CRS. It is not possible to confirm this hypothesis here, but it is a promising approach for further studies.

Our study was conducted with some important differences to the study by Warne and Warrington,<sup>16</sup> which showed significant improvements in both shoe conditions testing two defined velocities (for all participants 11 and 13 km/h). They investigated highly trained athletes (mean  $\text{VO}_2\text{max}$   $70.2 \pm 5.2 \text{ ml min}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  and 1500 m personal bests around 4 min) and lack a control group which limits the generalisability of their findings.<sup>28</sup> Therefore, this study<sup>16</sup> is not directly comparable to ours. The study of Fuller et al. showing significant results had a comparable study design to ours, but a larger sample size with 61 participants.<sup>17</sup>

A possible explanation for the lower improvements in the intervention group in MFW testing conditions could lie in the rate of transition. Possible enhancements in RE might not become evident until a full or further-progressed transition to MFW has been reached. Experienced MFW runners showed a noticeable difference between RE in different shoe conditions, even in studies with

crossover designs.<sup>6,13</sup> In the current literature, the question about the need for a 100% transition is still open, but guidelines and suggestion for transition have been published.<sup>19</sup> We chose a slow transition to MFW with up to 35% of the running mileage run in MFW. Even though this was not the study's purpose, the slow transition could be a reason for the low injury-related drop-out in the intervention group. On the other hand, the transition to MFW might not have been completed and therefore improvements in RE in MFW might not yet have become significant. To our knowledge, there are studies investigating a full transition (100% of training in MFW) in the current literature,<sup>29</sup> but they did not focus on the impact of a full transition on RE.

Before interpreting the results of our study, a few limitations should be taken into account. Our study included a small sample size with 32 participants. In total, 7 drop-outs were recorded, resulting in a reduction of statistical power and probably a lack of statistical significance in our study. Therefore, we recommend considering the ES for this study size and not only to focus on statistical significance as suggested by Hopkins et al.<sup>25</sup> Larger sample sizes are needed to confirm our findings.

Contrary to common belief, RE decreases with increasing speed for low speed ranges, but increases with increasing speed at a high speed range.<sup>26,30</sup> Our results confirm this since in both groups RE is lower in  $v\text{VO}_280\%$  than in  $v\text{VO}_270\%$ . In addition, testing velocity increased due to changes in  $v\text{VO}_2\text{max}$  in the intervention and decreased in the control group during the intervention time. Simultaneously, we observed unchanged or increased RE values in the control group and decreased RE values (=improvements) in the intervention group. Thus, it has to be assumed that the effect sizes are partially influenced by the higher testing velocity in the intervention group.

Another limitation was that RER at the steady state oxygen uptake at 90% of  $v\text{VO}_2\text{max}$  was  $\geq 1.00$ . Therefore, we excluded the data from the analysis. Furthermore, the individual participants in our groups were highly variable in RE test values. By applying inclusion criteria for participants, we tried to avoid heterogeneity in the sample. The mean values of both groups were comparable in



**Table 2**  
Pre- and post-test RE results for the control and intervention group in CRS and MFW conditions.

	Control group (n = 14) (training in CRS)				Intervention group (n = 11) (training in MFW)				Group by time effects between control and intervention group		MFW effect sizes vs. CRS effect sizes Effect sizes (95% CI)
	Pre		Post		Pre		Post		P value		
	Changes over time		Changes over time		Changes over time		Changes over time				
<b>CRS condition</b>											
<b>RE expressed as caloric unit cost (kcal km<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)</b>											
vVO <sub>2</sub> 70%	1.08 (0.07)	1.13 (0.08)	0.04 (0.10)	1.09 (0.08)	1.14 (0.10)	1.09 (0.08)	-0.04 (0.10)	0.1	0.68 (-0.14 to 1.51)		
vVO <sub>2</sub> 80%	1.06 (0.16)	1.11 (0.09)	0.06 (0.16)	1.08 (0.08)	1.14 (0.12)	1.08 (0.08)	-0.05 (0.12)	0.05	0.78 (0-1.56)		
<b>RE expressed as oxygen consumption (ml km<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)</b>											
vVO <sub>2</sub> 70%	223.64 (12.6)	226.98 (9.7)	2.3 (8.62)	223.07 (14.86)	233.07 (14.86)	225.63 (11.74)	-7.43 (13.57)	0.058	0.78 (-0.03 to 1.59)		
vVO <sub>2</sub> 80%	220.29 (10.87)	219.94 (9.4)	-1.91 (10.82)	228.35 (10.12)	228.35 (10.12)	221.76 (11.09)	-6.58 (9.16)	0.266	0.47 (-0.38 to 1.32)		
<b>RER</b>											
vVO <sub>2</sub> 70%	0.92 (0.03)	0.92 (0.03)		0.89 (0.03)	0.89 (0.03)	0.92 (0.03)					
vVO <sub>2</sub> 80%	0.95 (0.04)	0.97 (0.03)		0.94 (0.03)	0.94 (0.03)	0.96 (0.03)					
<b>MFW condition</b>											
<b>RE expressed as caloric unit cost (kcal km<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)</b>											
vVO <sub>2</sub> 70%	1.08 (0.09)	1.07 (0.08)	-0.01 (0.09)	1.08 (0.09)	1.12 (0.08)	1.08 (0.09)	-0.04 (0.07)	0.465	0.3 (-0.54 to 1.14)		
vVO <sub>2</sub> 80%	1.06 (0.07)	1.06 (0.06)	-0.003 (0.09)	1.08 (0.08)	1.12 (0.07)	1.08 (0.08)	-0.04 (0.06)	0.309	0.42 (-0.41 to 1.25)		
<b>RE expressed as oxygen consumption (ml km<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)</b>											
vVO <sub>2</sub> 70%	223.79 (14.47)	221.97 (12.91)	-1.81 (14.46)	227.07 (17.02)	227.07 (17.02)	224.20 (14.08)	-2.86 (11.75)	0.841	0.08 (-0.77 to 0.93)		
vVO <sub>2</sub> 80%	217.22 (12.40)	216.12 (10.19)	-1.1 (15.86)	224.05 (14.8)	224.05 (14.8)	220.90 (12.86)	-3.15 (11.73)	0.713	0.15 (-0.7 to 1)		
<b>RER</b>											
vVO <sub>2</sub> 70%	0.91 (0.04)	0.92 (0.04)		0.89 (0.04)	0.89 (0.04)	0.92 (0.03)					
vVO <sub>2</sub> 80%	0.96 (0.05)	0.96 (0.03)		0.93 (0.03)	0.93 (0.03)	0.96 (0.03)					

RE: Running economy, CRS: conventional running shoe, MFW: minimalist running shoe, vVO<sub>2</sub>: velocity at maximum oxygen consumption, RER: Respiratory exchange ratio. Data presented as mean and SD.

VO<sub>2</sub>max, running experience, and age (Table 1). The standard deviation of the VO<sub>2</sub>max values in our RCT are comparable to those of previous studies,<sup>9</sup> but a higher variability of the standard deviation was found for the RE test values. This could also be a reason for why no statistical significance was reached.

We found a statistically non-significant, but moderate improvement in RE in the intervention group. Even though our findings did not reach statistical significance, practical relevance might still be of importance. Further prospective controlled studies are needed to investigate a more homogeneous group regarding running performance level, as well as testing a possible transfer effect of training in MFW on RE and biomechanics in CRS.

## 5. Conclusion

Our study found small to moderate improvements of RE after 8 weeks of transitioning to MFW. Several long-term studies found an effect of MFW training on RE. However, evidence for possible transfer effect of MFW training on RE in other footwear through beneficial long-term effects on physiological and biomechanical changes is still missing. Further prospective studies are required to evaluate the effects of transition phases on transfer effects in biomechanics on RE and running performance.

## Practical implications

- Runners improve their running economy after 8 weeks of habituation to minimalist footwear compared to cushioned footwear.
- Although not reaching statistical significance, training in MFW compared to CRS resulted in small to moderate improvements in RE in both conditions; we speculate that the effects in CRS are related to changes in running biomechanics resulting from the MFW training.
- More empirical data is needed before giving conclusive guidelines for whether and what improvements and transfer effects are to be expected when training in MFW.

## Acknowledgements

We would like to acknowledge Nicholas R. Dunham, Eve-Mariek Hessas, Jan Hartmann and Ximena Ordonez for the critical revision of the manuscript. This project (Barefoot LIFE) was funded by the Ministry for Science and Research in Hamburg (grant number LFF-FV13). The authors thank the Leguano GmbH for providing all shoe materials used in this study.

## References

1. Foster C, Lucia A. Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports Med* 2007; 37(4-5):316-319.
2. Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1980; 12(5):357-360.
3. Guglielmo LG, Greco CC, Denadai BS. Effects of strength training on running economy. *Int J Sports Med* 2009; 30(1):27-32.
4. Tartaruga M, Brisswalter J, Peyré-Tartaruga L et al. The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Res Q Exerc Sport* 2012; 83(3):367-375.
5. Knuttgen HG. Oxygen uptake and pulse rate while running with undetermined and determined stride lengths at different speeds. *Acta Physiol Scand* 1961; 52:366-371.
6. Cheung RT, Ngai SP. Effects of footwear on running economy in distance runners: a meta-analytical review. *J Sci Med Sport* 2016; 19(3):260-266.
7. Divert C, Mornieux G, Freychat P et al. Barefoot-shod running differences: shoe or mass effect? *Int J Sports Med* 2008; 29(6):512-518.
8. Fuller JT, Bellenger CR, Thewlis D et al. The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners. *Sports Med* 2015; 45(3):411-422.
9. Warne JP, Moran KA, Warrington GD. Eight weeks gait retraining in minimalist footwear has no effect on running economy. *Hum Mov Sci* 2015; 42:183-192.
10. Miller EE, Whitcome KK, Lieberman DE et al. The effect of minimal shoes on arch structure and intrinsic foot muscle strength. *J Sport Health Sci* 2014; 3(2):74-85.



11. Fuller JT, Buckley JD, Tsiros MD et al. Redistribution of mechanical work at the knee and ankle joints during fast running in minimalist shoes. *J Athl Train* 2016; 51(10):806–812.
12. Squadrone R, Gallozzi C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners. *J Sports Med Phys Fitness* 2009; 49(1):6–13.
13. Perl DP, Daoud AI, Lieberman DE. Effects of footwear and strike type on running economy. *Med Sci Sports Exerc* 2012; 44(7):1335–1343.
14. Fuller JT, Thewlis D, Tsiros MD et al. Effects of a minimalist shoe on running economy and 5-km running performance. *J Sports Sci* 2016; 34(18):1740–1745.
15. Ridge ST, Standifird T, Rivera J et al. The effect of training in minimalist running shoes on running economy. *J Sports Sci Med* 2015; 14(3):643–647.
16. Warne JP, Warrington GD. Four-week habituation to simulated barefoot running improves running economy when compared with shod running. *Scand J Med Sci Sports* 2014; 24(3):563–568.
17. Fuller JT, Thewlis D, Tsiros MD et al. Six-week transition to minimalist shoes improves running economy and time-trial performance. *J Sci Med Sport* 2017; 20(12):1117–1122.
18. Hollander K, Heidt C, Van Der Zwaard B et al. Long-term effects of habitual barefoot running and walking: a systematic review. *Med Sci Sports Exerc* 2017; 49(4):752–762.
19. Warne JP, Gruber AH. Transitioning to minimal footwear: a systematic review of methods and future clinical recommendations. *Sports Med Open* 2017; 3(1):33.
20. Schulz KF, Altman DG, Moher D et al. CONSORT 2010 Statement: updated guidelines for reporting parallel group randomised trials. *BMC Med* 2010; 8:18.
21. Esculier JF, Dubois B, Dionne CE et al. A consensus definition and rating scale for minimalist shoes. *J Foot Ankle Res* 2015; 8:42.
22. Fletcher JR, Esau SP, Macintosh BR. Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol (1985)* 2009; 107(6):1918–1922.
23. Beck ON, Kipp S, Byrnes WC et al. Viewpoint: use aerobic energy expenditure instead of oxygen uptake to quantify exercise intensity and predict endurance performance. *J Appl Physiol (1985)* 2018 [Epub ahead of print].
24. Cohen J. Quantitative methods in psychology. *Psychol Bull* 1992; 112(1):155–159.
25. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc* 2009; 41(1):3–13.
26. Batliner ME, Kipp S, Grabowski AM et al. Does metabolic rate increase linearly with running speed in all distance runners? *Sports Med Int Open* 2017; 02(01):E1–E8.
27. Hollander K, Argubi-Wollesen A, Reer R et al. Comparison of minimalist footwear strategies for simulating barefoot running: a randomized crossover study. *PLoS One* 2015; 10(5):e0125880.
28. Kabisch M, Ruckes C, Seibert-Grafe M et al. Randomized controlled trials: part 17 of a series on evaluation of scientific publications. *Deutsches Arzteblatt Int* 2011; 108(39):663–668.
29. Giandolini M, Horvais N, Farges Y et al. Impact reduction through long-term intervention in recreational runners: midfoot strike pattern versus low-drop/low-heel height footwear. *Eur J Appl Physiol* 2013; 113(8):2077–2090.
30. Steudel-Numbers KL, Wall-Scheffler CM. Optimal running speed and the evolution of hominin hunting strategies. *J Hum Evol* 2009; 56:355–360.

## **2 Zusammenfassende Darstellung der Publikation**

### **2.1 Einleitung**

Der Wunsch nach einem natürlichen Laufgefühl hat Einzug in Lifestyle und Sport gehalten. Auch die Wissenschaft hat sich dieses Phänomens vermehrt angenommen und ist unter anderem der Frage nachgegangen, ob mit minimalistischen Schuhen maximale Ergebnisse erzielt werden können. Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss einer kontinuierlichen Steigerung des Trainingsanteils in minimalistischen Laufschuhen auf die Laufökonomie zu untersuchen.

Die Laufökonomie beschreibt den Energiebedarf beim Laufen. Sie ist definiert als der Sauerstoff- oder Energieverbrauch bei einer vorgegebenen submaximalen Geschwindigkeit und wird als Sauerstoffverbrauch bei konstanter und submaximaler Laufgeschwindigkeit quantifiziert (Daniels, 1985). Läufer mit einer guten Laufökonomie verbrauchen somit bei gleicher Geschwindigkeit weniger Energie als Läufer mit einer schlechten Laufökonomie (Daniels und Daniels, 1992; Guglielmo et al., 2009). Die Laufökonomie selbst wird durch unterschiedliche physiologische und biomechanische Faktoren beeinflusst (siehe hierzu ausführlich (Barnes und Kilding, 2015)). Auf diese wiederum wirkt unter anderem das Schuhwerk ein (Miller et al., 2014; Fuller et al., 2016). So sind der Einfluss des Barfußlaufens und des Laufens in minimalistischen Schuhen auf die Laufökonomie in den Fokus der Wissenschaft gerückt (Squadrone und Gallozzi, 2009; Warne und Warrington, 2014; Fuller et al., 2017). Minimalistische Laufschuhe sollen die natürliche Bewegung des Fußes nur minimal beeinträchtigen. Sie definieren sich als Schuhe mit hoher Flexibilität, wenig Gewicht, geringer Sprengung und durch das Fehlen von Bewegungskontrollen und Stabilitätsvorrichtungen (Esculier et al., 2015). Es wurde gezeigt, dass minimalistische Schuhe das Barfußlaufen simulieren können (Hollander et al., 2015). Untersuchungen zur Laufökonomie mit minimalistischen Schuhen haben unterschiedliche Effekte gezeigt. Zunächst haben Querschnittsstudien eine bessere Laufökonomie in minimalistischen als in konventionellen Laufschuhen festgestellt (Squadrone und Gallozzi, 2009). Langzeiteffekte auf die Laufökonomie wurden erstmals in einer Interventionsstudie von Warne und Warrington (Warne und Warrington, 2014) untersucht und nachgewiesen. Weitere Studien haben anschließend jedoch keine signifikanten Ergebnisse gebracht (Warne et al., 2015; Ridge et al., 2015; Hollander et al., 2017). Unter anderem konnte keine signifikante Beeinflussung auf die Laufökonomie durch zusätzliche Gangschulung oder freie

Trainingseinheiten in minimalistischen Schuhen ausgemacht werden (Warne et al., 2015; Ridge et al., 2015). Die bisherige Forschung über den Einfluss minimalistischer Schuhe auf die Laufökonomie sowie insbesondere die wenigen Interventionsstudien lieferten damit keine eindeutige Evidenz. Unsere Idee war es daher – in Abgrenzung zu den bisherigen Studien –, das Training in den minimalistischen Schuhen zu strukturieren. Dafür wurde der Anteil des wöchentlichen Trainings über einen Zeitraum von acht Wochen wöchentlich um 5% gesteigert.

Unsere Hypothese lautete, dass sich die Laufökonomie einer Interventionsgruppe nach acht Wochen Training in minimalistischen Schuhen im Vergleich zur Laufökonomie einer Kontrollgruppe verbessert.

## **2.2 Material und Methoden**

Dies war eine randomisierte kontrollierte Studie, die nach der CONSORT-Leitlinie zur Berichterstattung über randomisierte Studien (Schulz et al., 2010) durchgeführt wurde. Die lokale Ethikkommission der Fakultät für Psychologie und Bewegungswissenschaft der Universität Hamburg genehmigte sie im Vorfeld (ID 47). Retrospektiv wurde sie als DRKS00011076 im Deutschen Klinischen Studienregister registriert.

Wir rekrutierten insgesamt 32 männliche Freizeitläufer, die im Langstreckenlauf ( $\geq 10$  km) erfahren waren. Eingeschlossen in die Studie wurden Athleten, die zwischen 20 und 60 Jahre alt waren, mehr als drei Stunden pro Woche Lauftraining durchgeführt und in den letzten sechs Monaten unter Wettkampfbedingungen einen 10 km Lauf unter 50 Minuten absolviert hatten. Ausschlusskriterien waren Verletzungen der unteren Extremitäten innerhalb der letzten drei Monate vor der Studie oder Erfahrungen im Barfußlaufen oder im Laufen mit minimalistischen Schuhen. Die 32 Probanden wurden nach stratifizierter Randomisierung in eine Interventions- und eine Kontrollgruppe eingeteilt. So erhielten wir im Hinblick auf die Variablen Alter, Body-Mass-Index,  $VO_2\max$ , gelaufene Kilometer pro Woche und 10-km-Leistung zwei ausgewogene Probandengruppen. Als minimalistischer Laufschuh wurde das Modell Leguano aktiv (LEGUANO, St. Augustin, Deutschland, 0 mm Fersensenkung, keine Fußgewölbestütze, 220 g für die US-Größe 9, minimalistischer Indexwert = 88%) verwendet; als konventioneller Laufschuh das Modell Asics Cumulus 17 (ASICS, Kobe, Japan, 10 mm Fersensenkung, neutrale (keine) Fußgewölbestütze, 336 g für die US-Größe 9, minimalistischer Indexwert = 12% (Esculier et al., 2015)).

Der minimalistische Indexwert eines Schuhs wird aus den Faktoren Gewicht, Sprengung (Höhenunterschied von Ferse bis zum Vorfuß), Flexibilität, Fersenhöhe, Stabilität und Bewegungskontrolle berechnet.

Die Interventionsgruppe führte über acht Wochen eine Umstellung des Schuhwerks auf minimalistische Laufschuhe durch (vgl. die für die allgemeine Muskeladaption empfohlene Übergangsphase von vier bis acht Wochen (Warne und Gruber, 2017)). Dabei erfolgte eine kontinuierliche Steigerung (wöchentlich um 5%) des Laufpensums in minimalistischen Laufschuhen. Die erste Woche begann mit einer Akklimatisierungszeit von 3 x 10 Minuten in den neuen Schuhen. In der letzten Woche der Interventionsphase liefen alle Teilnehmer 35% ihres wöchentlichen Laufpensums in den Studenschuhen. Die anderen 65% des Laufpensums absolvierten die Probanden in ihren eigenen (bisherigen) Laufschuhen. Die Kontrollgruppe verfuhr mit den neuen konventionellen Laufschuhen gleichermaßen.

Die Studie umfasste zwei Vortests, gefolgt von der beschriebenen achtwöchigen Trainingsphase in den jeweiligen neuen Schuhen und zwei Nachtests. Vor- und Nachuntersuchungen waren identisch, fanden auf dem Laufband (T 200 COSMED, Rom, Italien) statt und beinhalteten die gleichen Messungen. In allen vier Tests wurden kontinuierlich Gasaustauschdaten gesammelt (Quark CPET COSMED, Rom, Italien). Alle Teilnehmer verzichteten zwei Stunden vor den Tests auf Nahrungsaufnahme, Koffein- und Alkoholkonsum und führten 24 Stunden vor den Testungen keine extensiven körperlichen Anstrengungen durch.

In dem ersten Vor-/Nachtest, der von allen Probanden in den neuen konventionellen Schuhen absolviert wurde, wurde der maximale Sauerstoffverbrauch untersucht (VO<sub>2</sub>max-Test). Der VO<sub>2</sub>max-Test wurde durch ein Rampentestprotokoll mit 2%-iger Laufbandsteigung durchgeführt. VO<sub>2</sub>max wurde als der höchste Mittelwert definiert, der über einen Zeitraum von 60 Sekunden erreicht wurde. Zudem wurde die Geschwindigkeit bei dem höchsten VO<sub>2</sub>max-Wert (vVO<sub>2</sub>max) aufgezeichnet.

Sieben Tage nach diesem (v)VO<sub>2</sub>max-Test wurden von allen Probanden zunächst in den konventionellen und anschließend in den minimalistischen Laufschuhen (bzw. randomisierend bei der Hälfte der Probanden in umgekehrter Reihenfolge) sogenannte Laufökonomie-VO<sub>2</sub>submax-Tests durchgeführt (zweiter Vor-/Nachtest). Das Laufökonomie-Protokoll begann dabei jeweils mit einem 3-minütigen Aufwärmen bei 5 km/h. Anschließend folgten mit einer Laufbandsteigung von 1% drei 5-Minuten-Läufe bei erst 70%, dann 80% und schließlich 90% der vVO<sub>2</sub>max. Die submaximale

Geschwindigkeit für die Laufökonomie-Messung wurde jeweils individuell, in Abhängigkeit von der  $v\text{VO}_2\text{max}$ -Testleistung, festgesetzt. Jede der drei Geschwindigkeitsstufen wurde durch eine 2-minütige Pause getrennt. Exhalierendes Gas wurde über jeweils 5 Minuten bei 70%, 80% und schließlich 90% analysiert. Die Mittelwerte der Gasaustauschdaten der jeweiligen letzten Testminute wurden verwendet, um die Laufökonomie zu bestimmen. Die Laufökonomie wurde definiert als Sauerstoffverbrauch ( $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ) oder als Energie, die zur Überwindung einer bestimmten Distanz benötigt wird ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ). Letztere Definition gilt als sensitiverer Ausdruck für die Laufökonomie; insbesondere bei Geschwindigkeitsänderungen (Beck et al., 2018; Fletcher et al., 2009). Da eine Erhöhung der Laufgeschwindigkeit auch die  $\text{VO}_2$ -Messungen beeinflussen kann (Batliner et al., 2018), berechneten wir die Laufökonomie als Energieverbrauch und Sauerstoffverbrauch pro Laufstrecke (km) und nicht pro Minute (Fletcher et al., 2009). Das Erreichen eines Steady States wurde durch das Atmungaustauschverhältnis (respiratory exchange ratio = RER) überprüft.

Um die Interventionseffekte statistisch zu untersuchen, wurden die Unterschiede in der Laufökonomie zwischen Vor- und Nachtest und zwischen der Interventions- und der Kontrollgruppe mittels ANOVA berechnet. Die Struktur der ANOVA war: Gruppe (Kontroll- und Interventionsgruppe) und Zeit (Pre- zu Posttest). Statistische Analysen wurden mit der Statistiksoftware Stata (Version 14.2) durchgeführt. Die statistische Signifikanz wurde bei  $\alpha \leq 0,05$  festgelegt. Die Effektstärken (ES) wurden als Verhältnis zwischen der Differenz der mittleren Veränderungswerte der beiden verschiedenen Gruppen und der gepoolten Standardabweichung für alle Teilnehmer berechnet und als trivial  $< 0.2$ , klein  $0.2-0.6$ , mittel  $0.6-1.2$  und groß  $> 1.2$  interpretiert (Cohen, 1992; Hopkins et al., 2009).

## **2.3 Ergebnisse**

Von den 32 Probanden konnten 25 diese Studie abschließen. Es schieden fünf Läufer aus der Kontroll- und zwei aus der Interventionsgruppe aus. Bei sechs Athleten war der Abbruch der Studie auf Verletzungen oder Krankheiten zurückzuführen, die nicht mit der Studie zusammenhingen. Bei einem Teilnehmer der Interventionsgruppe wurde eine Plantarfasziitis diagnostiziert, die möglicherweise mit der Intervention der Studie zusammenhing. Daher basiert die endgültige Interventionsanalyse auf 25 Teilnehmern, die an den Vor- und Nachtestungen

teilgenommen haben. Eine Übersicht über die deskriptiven Statistiken der beiden Gruppen findet sich in Tabelle 1 der Publikation. Alle Teilnehmer erreichten einen Steady State-Zustand mit einem Atmungaustauschverhältnis  $< 1.00$  bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  70% und 80%. Das Atmungaustauschverhältnis bei der Sauerstoffaufnahme im Steady State bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  90% betrug durchschnittlich  $\geq 1.00$ . Daher wurden die  $v\text{VO}_2\text{max}$  90% Daten aus der Analyse ausgeschlossen.

Die Laufökonomieergebnisse der Kontroll- und Interventionsgruppe sind in der Publikation in Tabelle 2 aufgelistet. Die Kontrollgruppe verbrauchte in den Läufen mit konventionellen Laufschuhen nach acht Wochen – wenn auch auf einem 5%-Level nicht signifikant – mehr Energie (Veränderung über die Zeit bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  70% von  $0.04 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  und bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  80% von  $0.06 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ). In den minimalistischen Schuhen ergab sich eine Veränderung über die Zeit bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  70% von  $-0.01 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  und bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  80% von  $-0.003 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . Die Interventionsgruppe verbrauchte in den Läufen in konventionellen Laufschuhen nach acht Wochen – ebenfalls nicht signifikant – weniger Energie (Veränderung über die Zeit bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  70% von  $-0.04 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  und bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  80% von  $-0.05 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ). In den minimalistischen Schuhen ergab sich eine Veränderung über die Zeit bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  70% und bei  $v\text{VO}_2\text{max}$  80% von jeweils  $-0.04 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . Zusammen betrachtet ergab dies eine verbesserte Laufökonomie in der Interventionsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe mit kleinen bis mittleren Effektstärken in beiden Schuhbedingungen. Die Effektstärken auf die Laufökonomie ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ) in den konventionellen Laufschuhen waren wie folgt: ES  $v\text{VO}_2\text{70\%}$ : 0.68; 95% CI: -0.14 bis 1.51; ES  $v\text{VO}_2\text{80\%}$ : 0.78; 95% CI: 0 bis 1.56. Die Effektstärken in minimalistischen Schuhen lagen bei: ES  $v\text{VO}_2\text{70\%}$ : 0.3; 95% CI: -0.54 bis 1.14; ES  $v\text{VO}_2\text{80\%}$ : 0.42; 95% CI: -0.41 bis 1.25.

Die ANOVA mit wiederholten Messungen zeigte nur in den konventionellen Laufschuhbedingungen bei  $v\text{VO}_2\text{80\%}$  eine zeitabhängige Wechselwirkung auf die Laufökonomie zwischen Kontroll- und Interventionsgruppe. Alle anderen Messungen waren nicht signifikant ( $p \geq 0.05$ ).

## 2.4 Diskussion

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen – in Effektstärken ausgedrückt –, dass eine wöchentliche kontinuierliche Erhöhung des Trainingsanteils in minimalistischen Laufschuhen über acht Wochen zu kleinen bis mittleren

Verbesserungen der Laufökonomie führte. Die Interventionsgruppe verbesserte sich vom Vor- zum Nachtest und im Vergleich zur Kontrollgruppe. Statistisch signifikant sind diese Ergebnisse jedoch nicht. Sie stimmen indes mit anderen Langzeitstudien überein, die eine Verbesserung der Laufökonomie nach dem jeweiligen Interventionszeitraum zeigen (Warne und Warrington, 2014; Ridge et al., 2015; Fuller et al., 2017).

Auffällig ist, dass sich die Laufökonomie der Interventionsgruppe nicht nur in den minimalistischen, sondern auch in den konventionellen Schuhen verbessert hat. Dies war auch schon in der Studie von Warne und Warrington (Warne und Warrington, 2014) der Fall, die eine 2,32%-ige Verbesserung der Laufökonomie zwischen Pre- und Posttestung in konventionellen Laufschuhbedingungen nach der Interventionsphase zeigte. Diese Verbesserungen waren – anders als in unserer Studie – auch signifikant. Im Unterschied zu unserer Studie untersuchten Warne und Warrington hochtrainierte Athleten (Mittelwerte  $VO_2\text{max}$ :  $70.2 \pm 5.2 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 1500m persönliche Bestzeit etwa 4 Minuten) bei zwei definierten Geschwindigkeiten (für alle Teilnehmer 11 und 13 km/h). In dieser Studie fehlte allerdings eine Kontrollgruppe, so dass die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt ist. Auch in der Studie von Ridge et al. (Ridge et al., 2015) zeigten sich Effekte auf die Laufökonomie in konventionellen Schuhen. Dort wurde die Verbesserung der Laufökonomie in beiden Schuhen durch die Anpassung an die Testbedingungen (z.B. Laufbandgewöhnung) und die zusätzliche Motivation durch die Teilnahme an einer Studie erklärt. Darauf aufbauend haben wir in unserer Studie einen zusätzlichen  $VO_2\text{max}$ -Test nach der achtwöchigen Intervention durchgeführt. Dadurch sollte eine mögliche maximale Leistungsverbesserung über diesen Zeitraum festgestellt werden und die Geschwindigkeit der Post- $VO_2\text{submax}$ -Messung angepasst werden. Gleichwohl zeigte sich auch in unserer Studie eine verbesserte Laufökonomie in konventionellen Schuhen. Folglich ist zu vermuten, dass die Effekte jedenfalls nicht nur auf eine zusätzliche Motivation der Teilnehmer zurückzuführen sind, sondern sich vielmehr ein Training in minimalistischen Schuhen auch auf die Laufökonomie unter konventionellen Schuhen auswirken kann.

Diese Annahme wird gestützt durch mehrere Studien (Warne und Warrington, 2014; Hollander et al., 2015; Fuller et al., 2015), die signifikante Effekte durch das Training in minimalistischen Laufschuhen auf die Laufbiomechanik (u.a. höhere Schrittfrequenz, kürzere Schrittlänge) herausgefunden haben. Es ist möglich, dass



sich Laufstilveränderungen in minimalistischen Schuhen auf das Laufen in konventionellen Schuhen übertragen (Übertragungseffekt) und somit zu einem reduzierten Sauerstoff- und Energieverbrauch führen. Dies lässt Spielraum für Interpretationen dahingehend, dass das Training in minimalistischen Schuhen das Training in konventionellen Laufschuhen nicht ersetzen, sondern ergänzen sollte. Es ist nicht möglich diese Hypothese durch unsere Studie zu bestätigen, aber es ist ein vielversprechender Ansatz für weitere Studien.

Unerwartet war zudem, dass sich die Interventionsgruppe in den minimalistischen Laufschuhbedingungen weniger verbessert hat als in den konventionellen. Eine Erklärung hierfür könnte in der Übergangsphase liegen. Verbesserungen der Laufökonomie werden möglicherweise erst dann richtig sichtbar, wenn ein vollständiger oder jedenfalls weiter fortgeschrittener Übergang ins minimalistische Laufen erreicht wurde. So zeigen in minimalistischen Schuhen erfahrene Läufer in Crossover Studien (Cheung und Ngai, 2016; Perl et al., 2012) eine signifikant bessere Laufökonomie in minimalistischen als in konventionellen Schuhbedingungen. In der aktuellen Literatur ist die Frage nach der Notwendigkeit eines 100%-igen Übergangs noch offen. Wir wählten einen langsamen Übergang zum Laufen in minimalistischen Schuhen bis hin zu 35% des wöchentlichen Laufumfangs. Dieser langsame Übergang könnte ein Grund für den geringen verletzungsbedingten Abbruch in der Interventionsgruppe sein.

Bei der Interpretation der Ergebnisse unserer Studie sollten einige Aspekte berücksichtigt werden. Unsere Studie umfasste mit 32 Probanden, von denen 25 die Studie beenden konnten, eine verhältnismäßig kleine Stichprobengröße. Dies führt zu einer Verringerung der statistischen Aussagekraft und ist wahrscheinlich mit ursächlich für das Fehlen der statistischen Signifikanz in unserer Studie. Daher haben wir uns in unserer Studie nicht nur auf die statistische Signifikanz bezogen, sondern zusätzlich die Effektstärken berechnet (Hopkins et al., 2009). Die Studie von Fuller et al. (Fuller et al., 2017), die zu Beginn unserer Studie noch nicht vorlag, lieferte mit einem vergleichbaren Studiendesign signifikante Ergebnisse bei einer größeren Stichprobengröße mit 61 Teilnehmern.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse unserer Studie, dass die Laufökonomie durch das achtwöchige Übergangstraining in minimalistischen Schuhen positiv beeinflusst wird. Eine verbesserte Laufökonomie war in der Interventionsgruppe in beiden Schuhbedingungen nach der Interventionsphase feststellbar. Auch wenn die

Ergebnisse keine Signifikanz aufzeigen, haben sie praktische Relevanz. Sie können in Zukunft in der Sportmedizin und Trainingswissenschaft berücksichtigt werden.

## **2.5 Ausblick**

Das Ziel weiterer Langzeitstudien sollte es sein, die mögliche Transferwirkung eines Trainings in minimalistischen Schuhen auf die Laufökonomie in anderen Schuhbedingungen zu untersuchen. Hinweise auf Übertragungseffekte ergaben sich in unserer Studie. Der Nachweis signifikanter Langzeitwirkungen auf physiologische und biomechanische Veränderungen fehlt jedoch aktuell. Die Datenerhebung der vorliegenden Studie erfasste zusätzlich kinetische Parameter (Boden-Kontakt-Zeit, Schrittfrequenz, Schrittlänge und Fußaufsatz), die hierfür verwendet werden können.

## 2.6 Literaturverzeichnis

- Barnes, K.R. und Kilding, A.E. 2015. Running Economy: Measurement, Norms, and Determining Factors. *Sports Med Open*, 1, 8.
- Batliner, M.E., Kipp, S., Grabowski, A.M., Kram, R. und Byrnes, W.C. 2018. Does Metabolic Rate Increase Linearly With Running Speed in All Distance Runners? *Open Access J Sports Med*, 2: E1-E8.
- Beck, O.N., Kipp, S., Byrnes, W.C. und Kram, R. 2018. Viewpoint: Use Aerobic Energy Expenditure Instead of Oxygen Uptake to Quantify Exercise Intensity and Predict Endurance Performance. *J Appl Physiol* (1985).
- Cheung, R.T. und Ngai, S.P. 2016. Effects of Footwear on Running Economy in Distance Runners: A Meta-Analytical Review. *J Sci Med Sport*, 19, 260-6.
- Cohen, J. 1992. Quantitative Methods in Psychology. *Psychol Bull*, Vol 112(1), 155-159.
- Daniels, J. 1985. A Physiologist's View of Running Economy. *Med Sci Sports Exerc.*
- Daniels, J. und Daniels, N. 1992. Running Economy of Elite Male and Female Runners. *Med Sci Sports Exerc*, 24, 483-9.
- Esculier, J.F., Dubois, B., Dionne, C.E., Leblond, J. und Roy, J.S. 2015. A Consensus Definition and Rating Scale for Minimalist Shoes. *J Foot Ankle Res*, 8, 42.
- Fletcher, J.R., Esau, S.P. und Macintosh, B.R. 2009. Economy of Running: Beyond the Measurement of Oxygen Uptake. *J Appl Physiol* (1985), 107, 1918-22.
- Fuller, J.T., Buckley, J.D., Tsiros, M.D., Brown, N.A. und Thewlis, D. 2016. Redistribution of Mechanical Work at the Knee and Ankle Joints During Fast Running in Minimalist Shoes. *J Athl Train*, 51, 806-812.
- Fuller, J.T., Thewlis, D., Tsiros, M.D., Brown, N.A. und Buckley, J.D. 2015. The Long-Term Effect of Minimalist Shoes on Running Performance and Injury: Design of a Randomised Controlled Trial. *BMJ Open*, 5, e008307.
- Fuller, J.T., Thewlis, D., Tsiros, M.D., Brown, N.A.T. und Buckley, J.D. 2017. Six-Week Transition to Minimalist Shoes Improves Running Economy and Time-Trial Performance. *J Sci Med Sport*, 20, 1117-1122.
- Guglielmo, L.G., Greco, C.C. und Denadai, B.S. 2009. Effects of Strength Training on Running Economy. *Int J Sports Med*, 30, 27-32.
- Hollander, K., Argubi-Wollesen, A., Reer, R. und Zech, A. 2015. Comparison of Minimalist Footwear Strategies for Simulating Barefoot Running: A Randomized Crossover Study. *PLoS One*, 10, e0125880.
- Hollander, K., Heidt, C., Van Der Zwaard, B.C., Braumann, K. M. und Zech, A. 2017. Long-Term Effects of Habitual Barefoot Running and Walking: A Systematic Review. *Med Sci Sports Exerc*, 49, 752-762.
- Hopkins, W.G., Marshall, S.W., Batterham, A.M. und Hanin, J. 2009. Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Med Sci Sports Exerc*, 41, 3-13.
- Miller, E.E., Whitcome, K.K., Lieberman, D.E., Norton, H.L. und Dyer, R.E. 2014. The Effect of Minimal Shoes on Arch Structure and Intrinsic Foot Muscle Strength. *J Sport Health Sci* 3, 74-85.
- Perl, D.P., Daoud, A.I. und Lieberman, D.E. 2012. Effects of Footwear and Strike Type on Running Economy. *Med Sci Sports Exerc*, 44, 1335-43.
- Ridge, S., Standifird, T., Rivera, J., Johnson, A., Mitchell, U. und Hunter, I. 2015. The Effect of Training in Minimalist Running Shoes on Running Economy. *J Sports Sci Med*, 14, 643-7.

- Schulz, K.F., Altman, D.G. und Moher, D. 2010. Consort 2010 Statement: Updated Guidelines for Reporting Parallel Group Randomised Trials. *BMC Medicine*.
- Squadrone, R. und Gallozzi, C. 2009. Biomechanical and Physiological Comparison of Barefoot and Two Shod Conditions in Experienced Barefoot Runners. *J Sports Med Phys Fitness*, 49, 6-13.
- Warne, J.P. und Gruber, A.H. 2017. Transitioning to Minimal Footwear: A Systematic Review of Methods and Future Clinical Recommendations. *Sports Med Open*, 3, 33.
- Warne, J.P., Moran, K.A. und Warrington, G.D. 2015. Eight Weeks Gait Retraining in Minimalist Footwear Has No Effect on Running Economy. *Hum Mov Sci*, 42, 183-92.
- Warne, J.P. und Warrington, G.D. 2014. Four-Week Habituation to Simulated Barefoot Running Improves Running Economy When Compared with Shod Running. *Scand J Med Sci Sports*, 24, 563-8.

### 3.1 Kurzfassung der Publikation in deutscher Sprache

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen – ausgedrückt in Effektstärken –, dass eine wöchentliche kontinuierliche Erhöhung des Trainingsanteils in minimalistischen Laufschuhen über acht Wochen zu kleinen bis mittleren Verbesserungen der Laufökonomie führt. Die Interventionsgruppe verbesserte sich vom Vor- zum Nachtest und im Vergleich zur Kontrollgruppe. Statistisch signifikant sind diese Ergebnisse jedoch nicht.

Die Studie wurde als randomisierte kontrollierte Studie mit 32 Teilnehmern (davon sieben Ausfälle) konzipiert. Die Teilnehmer waren ausschließlich männliche, ambitionierte Amateurläufer. Sie wurden zufällig entweder einer achtwöchigen Trainingsintervention in minimalistischen (= Interventionsgruppe) oder konventionellen Laufschuhen (= Kontrollgruppe) zugeteilt. Die Intervention bestand aus einer wöchentlichen Erhöhung der Laufzeit in den Studenschuhen um 5% des wöchentlichen Laufumfangs bis hin zu 35%. Jeweils vor und nach dem achtwöchigen Interventionszeitraum führten wir einen  $VO_2\text{max}$ -Test durch; jeweils weitere sieben Tage später einen submaximalen Laufökonomie-Test bei 70% und 80% (und nicht ausgewerteten 90%) der Geschwindigkeit bei  $VO_2\text{max}$  ( $vVO_2\text{max}$ ) in beiden Schuhbedingungen. Die Laufökonomie wurde bei den submaximalen Tests gemessen und als Energie, die zur Überwindung einer bestimmten Distanz benötigt wird ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ), oder als Sauerstoffverbrauch ( $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ) definiert.

Die Effektstärken wurden als Verhältnis zwischen der Differenz der Mittelwertunterschiede der beiden verschiedenen Gruppen und der gepoolten Standardabweichung für alle Teilnehmer berechnet und als trivial  $< 0.2$ , klein  $0.2-0.6$ , mittel  $0.6-1.2$  und groß  $> 1.2$  interpretiert. Diese Effekte waren statistisch nicht signifikant ( $p > 0.05$ ). Die Effektstärken auf die Laufökonomie ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ) in konventionellen Laufschuhen waren: ES  $vVO_270\%$ : 0.68; 95% CI: -0.14 bis 1.51; ES  $vVO_280\%$ : 0.78; 95% CI: 0 bis 1.56. Die Effektstärken in minimalistischen Schuhen lagen bei: ES  $vVO_270\%$ : 0.3; 95% CI: -0.54 bis 1.14; ES  $vVO_280\%$ : 0.42; 95% CI: -0.41 bis 1.25.

Auffällig ist, dass sich die Laufökonomie der Interventionsgruppe nicht nur in den minimalistischen, sondern auch in den konventionellen Schuhen verbessert hat. Dies lässt vermuten, dass sich ein Training in minimalistischen Schuhen auch auf die Laufökonomie unter konventionellen Bedingungen auswirken kann. Unerwartet war zudem, dass sich die Interventionsgruppe in den minimalistischen Laufschuhbedingungen weniger verbessert hat als in den konventionellen. Eine Erklärung hierfür könnte in der mit 35% nicht ausgereizten Übergangsphase liegen.

### 3.2 Kurzfassung der Publikation in englischer Sprache

The results of this study, expressed in effect sizes, show that a weekly continuous increase of training in minimalist running shoes over eight weeks results in small to moderate improvements in running economy. The running economy of the intervention group improved from pre-test to post-test and also compared to the control group. However, these results are not statistically significant.

The study was designed as a randomized controlled trial with 32 participants (including seven failures). The participants were exclusively male recreational runners. They were randomly assigned to either an eight-week training intervention in minimalist (= intervention group) or conventional running shoes (= control group). The intervention consisted of a gradual increase in use of the new footwear by 5% of the individual weekly running distance up to 35%. Each time before and after the eight-week intervention period, a  $\dot{V}O_{2\max}$  test was performed. Seven days later, a submaximal running economy test was conducted at 70% and 80% (and excluded 90%) of the speed at  $\dot{V}O_{2\max}$  ( $v\dot{V}O_{2\max}$ ) in both shoe conditions. Running economy was measured at the submaximal tests and expressed as energy required to cover a given distance ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ) or oxygen consumption ( $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ).

The effect sizes (ES) on the running economy ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ) in conventional running shoes were: ES  $v\dot{V}O_{270\%}$ : 0.68; 95% CI: -0.14 to 1.51; ES  $v\dot{V}O_{280\%}$ : 0.78; 95% CI: 0 to 1.56. The effect sizes in minimalistic shoes were: ES  $v\dot{V}O_{270\%}$ : 0.3; 95% CI: -0.54 to 1.14; ES  $v\dot{V}O_{280\%}$ : 0.42; 95% CI: -0.41 to 1.25. Effect sizes were calculated as the ratio between the difference between the mean changes values of the two different groups and the pooled standard deviation for all participants and were interpreted as trivial < 0.2, small 0.2-0.6, moderate 0.6-1.2 and large > 1.2. These effects were not statistically significant ( $p > 0.05$ ).

It is noticeable that the running economy of the intervention group has improved not only in the minimalist, but also in the conventional running shoes. This suggests that training in minimalist footwear can also affect running economy in conventional running shoe conditions. It was unexpected that the running economy of the intervention group has improved less in the minimalist running conditions than in the conventional conditions. A possible reason could be the transition period, which was not exhausted with 35%.

#### **4 Erklärung des Eigenanteils**

Ich bin alleinige Erstautorin der vorliegenden Publikation mit dem Titel „Improving Running Economy by Transitioning to Minimalist Footwear: A Randomized Controlled Trial“, veröffentlicht am 26.05.2018 im Fachjournal „Journal of Science and Medicine in Sport“ (Elsevier).

Gemeinsam mit meinem Betreuer und Letztautor Dr. Dr. Karsten Hollander habe ich das Studiendesign entwickelt. Den Ethikantrag habe ich – unter Hilfestellung meines Betreuers – selbst gestellt. Gleiches gilt für die Probandenrekrutierung und die Vorbereitung der Experimente. Die Versuchsdurchführung und Datenerhebung erfolgten eigenständig. Auch die Rohdaten aller Versuche habe ich selbstständig aufgearbeitet und analysiert. Die statistische Analyse erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Koautor Asmus Zoch. Die Ergebnisse wurden mit meinem Doktorvater Prof. Dr. Klaus-Michael Braumann sowie meinem Betreuer Dr. Dr. Karsten Hollander und Prof. Dr. Astrid Zech interpretiert und diskutiert.

Das Manuskript habe ich eigenständig verfasst und mit meinen Koautoren publiziert.



## **5 Danksagung**

Danksagung entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.

## **6 Lebenslauf**

Lebenslauf entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.

## **7 Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: .....