

Der Einfluss zunehmender Ermüdung beim Laufen auf die Entwicklung der Kinematik der unteren Extremitäten bei trainierten Läufern

Abschlussarbeit zur Erlangung des
Master of Science in Sportwissenschaften
Option Gesundheit und Forschung
eingereicht von

Tabitha Ingold

an der
Universität Freiburg, Schweiz
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Departement für Medizin

in Zusammenarbeit mit der
Eidgenössischen Hochschule für Sport Magglingen

Referent
Prof. Wolfgang Taube

Langenthal, Dezember 2017

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	4
1.1 Kinematik	7
1.2 Ermüdung	14
1.3 Ermüdung und kinematische Veränderungen während des Laufens	17
1.4 Ziel der Arbeit	19
2 Methode	20
2.1 Probanden	20
2.2 Protokoll	20
2.3 Messinstrumente	24
2.4 Datenanalyse	25
2.5 Statistik	26
3 Resultate	28
3.1 Resultate der spatio-temporalen Parameter	28
3.2 Resultate der kinematischen Messungen	28
4 Diskussion	38
5 Schlussfolgerung	43
Literatur	44
Anhang	50
Dank	91

Zusammenfassung

Der Laufsport hat in den letzten Jahrzehnten enorm an Popularität zugenommen. Mit den steigenden Teilnehmerzahlen an Laufevents nahm auch die Zahl der laufbedingten Verletzungen in den letzten Jahren stark zu. In der Untersuchung dieser Verletzungen wurden bereits viele Faktoren diskutiert, welche Überlastungsschäden begünstigen. Unter anderem kam der Ermüdung und der dadurch entstehenden kinematischen Veränderungen des Laufbildes immer mehr Bedeutung zu. Es wird angenommen, dass Ermüdung zu einer Veränderung der Bewegungsstruktur während des Laufens führt und somit das Bewegungs- und Stützsystem stärker belastet. Anhand eines submaximalen Laufes soll daher untersucht werden, wie sich die Gelenkskinematik der unteren Extremitäten unter zunehmender Ermüdung verändert. Dazu wurden regelmässig trainierende Läufer anhand acht 3D-Kameras und zwei 2D-Kameras während eines submaximalen Laufes von 42 Minuten an vier Messzeitpunkten aufgenommen, um so die Veränderungen der Gelenkskinematik der unteren Extremitäten unter zunehmender Ermüdung festzuhalten. Die Resultate zeigten, dass die Hüft- und Knieadduktion sowie die Beckenrotation zwischen unermüdetem und ermüdetem Zustand in der mittleren Stützphase und die Hüft- und Knieextension sowie die Plantarflexion, die Inversion und die Adduktion signifikant während der Abdruckphase zunahmen. Die grössten Veränderungen zeigten sich jedoch nicht wie erwartet gegen Ende des Laufes sondern bereits zu Beginn des Laufes. Folglich ist anzunehmen, dass die Veränderungen nicht ermüdungsbedingt waren sondern vielmehr einer effizienteren Laufbewegung dienten. Es bleibt unklar, wie sich längere Belastungen unter stärkerer Ermüdung auf die Kinematik der unteren Extremitäten auswirken und somit die Belastungen auf das Bewegungs- und Stützsystems erhöhen.

1 Einleitung

Sportliche Aktivität und sportliches Training haben eine positive Auswirkung auf den Gesundheitszustand der trainierenden Person, wie beispielsweise die Reduktion von Übergewicht oder die Prävention von kardiovaskulären Krankheiten. Aufgrund der einfachen Durchführungsmöglichkeit und dem steigenden Interesse der Krankheitsprävention hat gerade der Laufsport in den letzten Jahrzehnten enorm an Popularität zugenommen (van Gent et al., 2007). Auch die wachsenden Teilnehmerzahlen an Laufevents zeigen das grosse Interesse an der Sportart «Laufen» (Mariani, 2014). Durch diese Popularität, stiegen jedoch die laufbedingten Verletzungen und Überlastungsschäden überwiegend im Bereich der unteren Extremitäten. Dies zeigt auch die steigende Inzidenz der Verletzungen. Die jährliche Verletzungsrate der regelmässig trainierenden Läufer lag bei van Mechelen (1992) noch zwischen 37 % und 56 %. Diese stieg in den folgenden Jahren deutlich an und so weisen Van Gent et al. (2007) in ihrem Review eine noch höhere Verletzungsrate auf. Aus den untersuchten Studien fassen sie zusammen, dass die jährliche Verletzungsrate der Läufer, welche an Verletzungen der unteren Extremitäten litten, zwischen 19.4 bis 79.3 % liegt. Bei Studien, die auch die Verletzungen miteinbeziehen, die nicht die unteren Extremitäten betreffen, liegt die Inzidenz sogar zwischen 19.4 % bis 92.4 %. Diese grosse Spannweite der Inzidenzrate beruht auf den unterschiedlichen Definitionen von Verletzung, den zum Teil differierenden Studienpopulationen und der Messdauer der Studien bezüglich des Verletzungsrisikos (Hoeberigs, 1992). Neben den akuten Verletzungen im Laufsport (Sprunggelenksdistorsion, akute Muskelverletzungen) treten vor allem Überlastungsschäden auf (Walther, Reuter, Leonhard & Engelhardt, 2005; Wen, 2007). Am häufigsten davon betroffen sind das Knie, die Unterschenkelregion, der Oberschenkel sowie der Fuss inklusive Zehen (Taunton et al. 2002; van Gent et al. 2007; Fredericson & Misra, 2007). Weitverbreitete Befunde sind vor allem das Patellofemorale Schmerzsyndrom, Reizungen des Iliotibialbandes sowie der Achillessehne, Plantarfasziitis und Stressfrakturen (Wen, 2007; Taunton et al., 2002; van Mechelen, 1992). Davon betroffen sind insbesondere Langstreckenläufer (Johnson, 1985).

Die Untersuchung der überbelastungsbedingten Laufverletzungen war in den letzten Jahren zunehmend Gegenstand wissenschaftlicher Forschung. Dennoch können Ätiologie, Inzidenz und Prävalenz von Laufverletzungen als solches kaum abschliessend beurteilt werden

(Taunton et al. 2002). Die Ursachen der Überlastungsverletzungen im Laufsport sind multifaktoriell. Überlastungsschäden werden als Resultat repetitiver Mikrotraumas beschrieben, welche durch wiederholte Belastungsreize die Belastbarkeit der beanspruchten Struktur (Bänder, Sehnen, Knochen oder Muskulatur) übersteigt. Dabei spielen vor allem unterschiedliche Anpassungs- und Ermüdungsmechanismen des muskuloskelettalen Systems eine Rolle (Meeuwise, 1994; Hreljac, 2005; Walther, Reuter, Leonhardt & Engelhardt 2005). Obwohl wiederholte Belastungsreize zu einem Überlastungsschaden führen können, sind Belastungsreize grundsätzlich unerlässlich um eine Struktur zu stärken. Bereits vor über 100 Jahren beschrieb Wolff (1893) in seinem Buch «Gesetz der Transformation der Knochen», dass sich das Skelettsystem mit der Zeit an äussere Anforderungen anpasst. Anhand einer Belastungs-Häufigkeitskurve kann das Verhältnis von Belastungshöhe und Belastungshäufigkeit aufgezeigt werden (vgl. Abbildung 1). Wiederholte adäquate Belastungsreize unterhalb der Grenze der Belastbarkeit einer Struktur führen durch funktionelle und morphologische Anpassungen zu einer Stärkung der Struktur. Dies führt zu einer Verschiebung der Kurve nach rechts und nach oben. Bleiben Belastungsreize über eine längere Zeit aus, verschiebt sich die Kurve nach unten und nach links und das Verletzungspotential steigt (Hreljac, 2005). Dabei verhält sich diese Kurve für jede Struktur individuell. Während sich die Muskulatur in ihrer Funktionsweise vergleichsweise schnell an bestimmte Reize adaptiert, brauchen passive Strukturen wie Sehnen und Bänder viel länger, um sich anzupassen (Harre, Krug, & Schnabel, 2008).

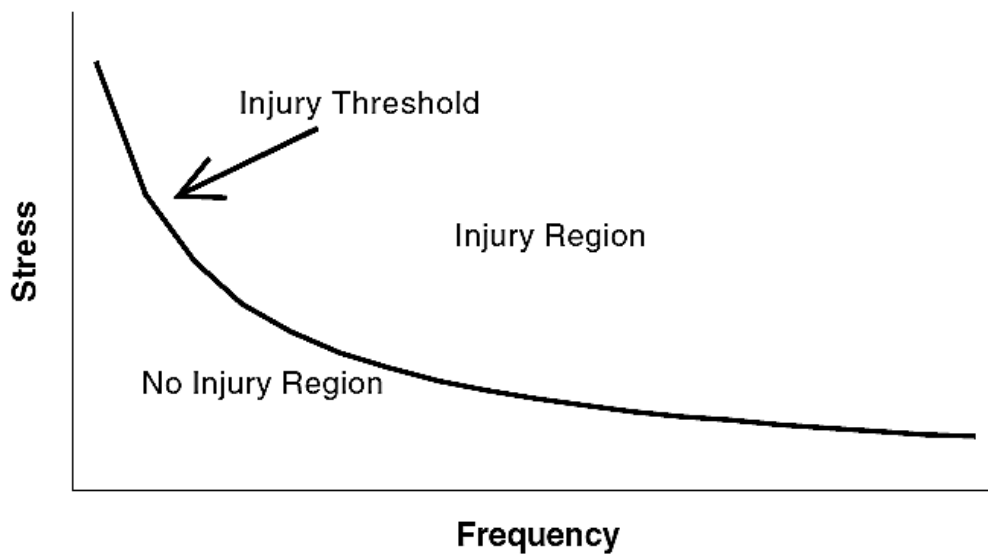


Abbildung 1. Theoretische Beziehung zwischen Belastungsintensität (y-Achse) und deren Auftretenshäufigkeit (x-Achse) auf das Auftreten von Überlastungsschäden. Belastungsreize unterhalb des Injury Threshold führen zu keiner Verletzung der Strukturen, Belastungsreize oberhalb des Injury Threshold führen entweder zu akuten Verletzungen oder zu Überlastungsverletzungen (Hreljac, 2005, S. 652).

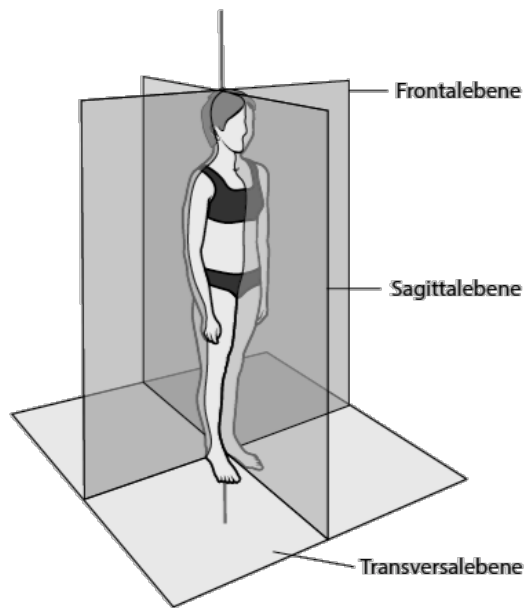
Diese eben beschriebenen Anpassungsprozesse der verschiedenen Strukturen geschehen längerfristig. Die Belastbarkeit der verschiedenen Strukturen verändert sich jedoch nicht nur längerfristig, sondern bereits innerhalb einer einzelnen Trainingseinheit (Neumann & Hottenrott, 2016). Wie stark die Strukturen dabei durch eine Belastung beansprucht werden hängt neben extrinsischen Faktoren wie beispielsweise Laufgeschwindigkeit, Schuhwerk oder Laufuntergrund auch von intrinsischen Faktoren wie vorhergehende Verletzungen, Trainingszustand, anthropometrischen und anatomischen Gegebenheiten ab (Hreljac, Marshall & Hume, 2000; Macera, 1992; Taimela, Kujala & Osterman, 1990; Taunton et al. 2002; Wen, 2007). Ein weiterer Faktor, welcher bereits mehrfach untersucht wurde, sind kinematische Veränderungen des Laufbildes, welche die Belastungen auf das Bewegungs- und Stützsystem erhöhen und somit Überlastungsschäden begünstigen können (Barton, Levinger, Crossley, Webster & Menz, 2012). Eine zentrale Rolle spielt dabei die Ermüdung, welche als eine der Ursachen für die kinematischen Veränderungen der Laufbewegung gesehen wird (Dierks, Davis & Hamill, 2010; Herljac, 2005; Neumann & Hottenrott 2016). Durch die zyklische Natur der Laufbewegung sind die Strukturen in kurzer Zeit wiederholten Belastungsreizen ausgesetzt. Während sich diese Belastungsreize im Einzelnen unterhalb der «Injury Region» befinden, kann die Akkumulation der Belastungsreize schliesslich zu einem

Überlastungsschaden führen. Die Muskulatur ist hauptsächlich dafür verantwortlich, die Belastungsspitzen auf das Bewegungs- und Stützsystems zu verringern und abzdämpfen (Radin, 1986). Dies wird primär durch den Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus gewährleistet (Dierks, Davis & Hamill, 2010), welcher im Verlaufe der Arbeit noch näher beschrieben wird. Durch Ermüdung wird diese schützende Funktion der Muskulatur jedoch beeinträchtigt. Durch einen Verlust an Kraft und Flexibilität der Muskulatur wird die Bewegungskoordination zunehmend erschwert (Neumann & Hottenrott, 2016). Folglich ist anzunehmen, dass eine Veränderung der Gelenkwinkel während eines Laufes auftreten (Dierks, Davis & Hamill, 2010; Hottenrott, Hoos & Sommer, 2001; Komi, 2000). Aus biomechanischer Sicht ist es daher interessant, wie sich zunehmende Ermüdung auf die Gelenkskinematik bei einem Lauf auswirkt.

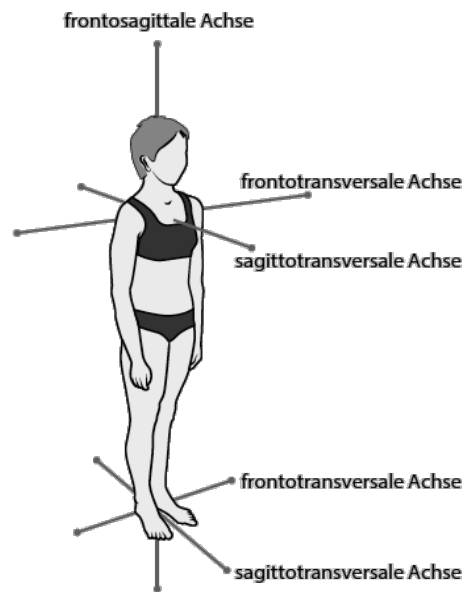
1.1 Kinematik

Die Kinematik befasst sich mit der Beschreibung von Bewegungen einzelner Körper unter Berücksichtigung räumlich-zeitlicher Aspekte ungeachtet der Kräfte, welche die Bewegungen verursachen. Bewegungen finden jeweils immer in Bewegungsebenen und um Bewegungsachsen statt. In Bezug auf den menschlichen Körper wird von der Frontalebene, der Sagittalebene und der Transversalebene gesprochen. Die Schnittlinien der Ebenen ergeben die Bewegungsachsen. Jedes Gelenk des menschlichen Körpers hat mindestens eine Bewegungsachse (Appell & Stang-Voss, 2008; Marquardt, 2012).

In der Schnittlinie der Frontal- und der Transversalebene liegt die frontotransversale Achse. Die Bewegungen um diese Achse und somit Bewegungen in der Sagittalebene werden als Flexions- und Extensionsbewegungen für den Thorax, das Hüft- und das Kniegelenk, als Dorsalextension und Plantarflexion im Sprunggelenk und im Beckenbereich als Beckenkipfung nach vorne (anterior Tilt) und Beckenkipfung nach hinten (posterior Tilt) beschrieben (vgl. Abbildung 3a und b). Die sagittotransversale Achse kommt in der Schnittlinie von Sagittal- und Transversalebene zu liegen. Bewegungen um diese Achse finden in der Frontalebene statt (vgl. Abbildung 4a und b). Im Knie- und Hüftgelenk und bezogen auf die Bewegungen des Thorax werden diese als Abduktions- und Adduktionsbewegungen definiert. Im Fussgelenk werden diese Bewegungen als Eversion und Inversion und im Beckenbereich als Obliquity bezeichnet. In der Schnittlinie der Frontal- und der Sagittalebene liegt die frontosagittale Achse. Bewegungen um diese Achse finden in der Transversalebene statt und werden als Innen- und Aussenrotation bezeichnet (vgl. Abbildung 5a und b) (Suppé, 2014).

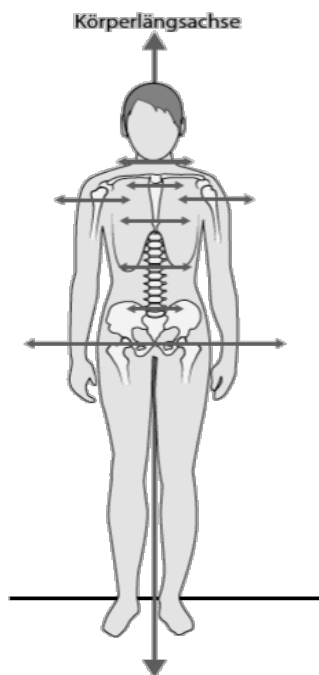


a.

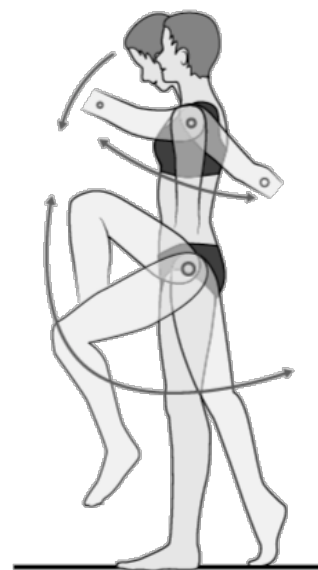


b.

Abbildung 2a und b. a: Körperebenen und b: Körperachsen (Suppé, 2014, S. 17)

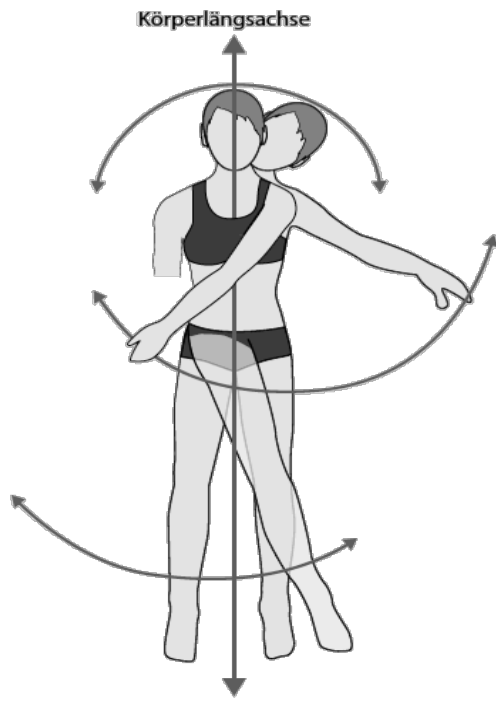


a.

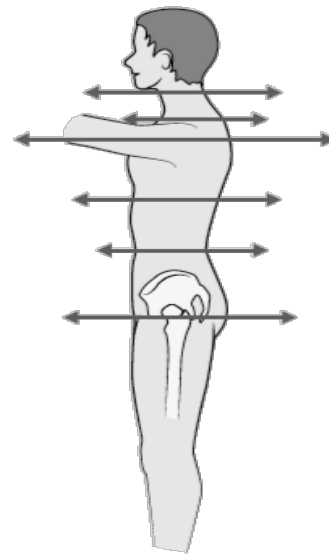


b.

Abbildung 3a, b: a: Frontotransversale Bewegungsachsen für Flexions- und Extensionsbewegungen von Kopf, Wirbelsäule, Rumpf, Becken, Arme und Beine und b: Bewegungsrichtungen um die frontotransversale Achse in der Sagittalebene (Suppé, 2014, S. 22)

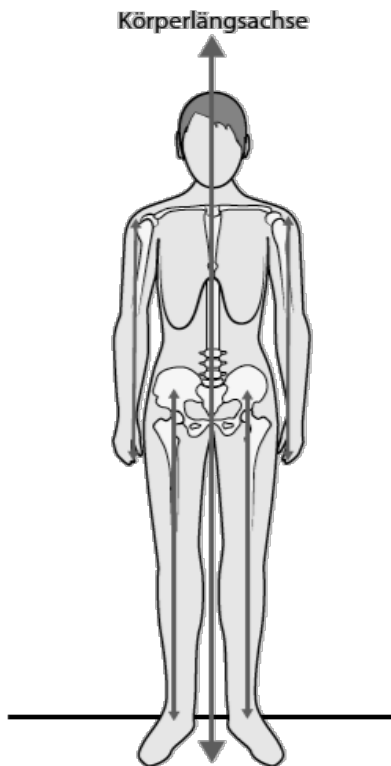


a.

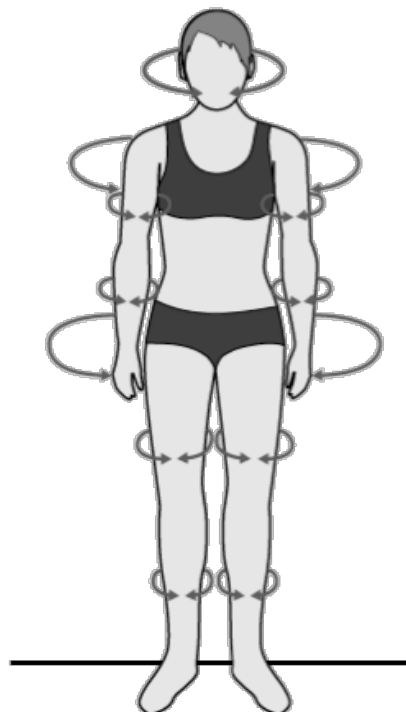


b.

Abbildung 4a, b. a Sagittotransversale Bewegungsachsen für Ab- und Adduktionsbewegungen der Arme und Beine sowie Lateralflexion der Körperabschnitte Kopf, Brustkorb, Wirbelsäule und Becken, b Bewegungsrichtungen um die sagittotransversale Achse in der Frontalebene (Suppé, 2014, S. 20)



a.



b.

Abbildung 5a und b. a: Frontosagittale Bewegungsachsen für Rotationsbewegungen von Kopf, Brustkorb, Wirbelsäule, Becken, Arme und Beine und b: Bewegungsrichtungen um die frontosagittale Achse in der Transversalebene nach (Suppé, 2014, S. 18)

Um dreidimensionale Bewegungen zu beschreiben wird der Körper in einzelne Segmente eingeteilt und für jedes Segment wird ein lokales (bewegtes) Koordinatensystem bestimmt. Diese werden im Massezentrum des zu vermessenden Körpers platziert. Neben den lokalen Koordinatensystemen wird zusätzlich ein ortsfestes (globales) Koordinatensystem definiert. Das ortsfeste Koordinatensystem entspricht dem Raum, in welchem die Bewegung erfasst wird. In Bezug zu den Bewegungsachsen entsprechen die x-Achse der Frontotransversalachse, die y-Achse der Sagittotransversalachse und die z-Achse der Frontosagittalachse. Bewegungen können als relative oder absolute Winkelveränderungen beschrieben werden. Werden Winkel zwischen zwei lokalen Koordinatensystemen beschrieben, wie beispielsweise der Kniegelenkwinkel, welcher anhand des Oberschenkel- und des Unterschenkelsegments bestimmt wird, wird von relativen Winkeln gesprochen. Als absolute Winkel werden die Winkel bezeichnet, welche zwischen einem lokalen und dem globalen Koordinatensystem berechnet werden, wie etwa die Bewegung des Beckens in Bezug zum Raum (Robertson, Caldwell, Hamill, Kamen & Whittlesey, 2013).

1.1.1 Gangzyklus. Der Gangzyklus dient als Grundlage in der Lauf- und Ganganalyse (Gage, 1990) und wird definiert als eine Reihe von Ereignissen beziehungsweise Bewegungen der unteren Extremitäten während der Fortbewegung. Ein Gangzyklus beginnt mit dem ersten Bodenkontakt eines Fusses und endet mit dem darauffolgenden Bodenkontakt des gleichen Fusses (Dicharry, 2010; Novacheck, 1998). Ein Gangzyklus umfasst zwei Hauptphasen: i) die Stützphase, welche mit dem Aufsetzen des Fusses am Boden beginnt und ii) die Schwungphase in welcher der Fuss den Boden nicht berührt (Nicola & Jewison, 2012; Novacheck, 1998). Das Verhältnis zwischen Stütz- und Schwungphase liegt beim Gehen bei ca. 62 % zu 38 % (Vaughan, 1984). Mit zunehmender Laufgeschwindigkeit verändert sich das Verhältnis zwischen Stütz- und Schwungphase wobei die Stützphase prozentual kürzer wird und der Anteil der Schwungphase zunimmt (Novacheck, 1998). Bei einem Laufschrift von 5 m/s liegt das Verhältnis zwischen Stütz- und Schwungphase bei rund 30 % zu 70 % (Vaughan, 1984). Im Vergleich zum Gehen gibt es beim Laufen keine Phase, in welcher beide Füße den Boden berühren, dafür aber einen Zeitraum, in welchem beide Füße in der Luft sind. Um die biomechanischen Abläufe während der Stützphase besser zu verstehen, wird diese in der Literatur noch weiter untergliedert. Dazu werden von verschiedenen Autoren unterschiedliche Phasen-Modelle zur Beschreibung des Gangzyklus verwendet.

Phasen-Modelle. Bauersfeld und Schröter (1992) unterteilen die Stützphase sowie die Schwungphase in eine vordere und hintere Stütz- beziehungsweise Schwungphase. Diese Untergliederung ist auf die unterschiedliche Beintätigkeit während dieser Phase zurückzuführen. Der Beginn der vorderen Stützphase ist durch das Aufsetzen des Fusses am Boden gekennzeichnet. Das Stützbein befindet sich während der vorderen Stützphase vor dem Körperschwerpunkt und hat in dieser Phase eine abbremssende Aufgabe. In der hinteren Stützphase wird durch das Strecken des Stützbeines der Körper nach vorne und oben beschleunigt und die Flugphase wird eingeleitet. Die hintere Stützphase endet mit dem Abheben des Fusses vom Boden. Die vordere Stützphase wird durch den Übergang von Kniebeugung zu Kniestreckung von der hinteren Stützphase abgegrenzt. Während die vordere Stützphase durch die Amortisation der Last charakterisiert wird, dient die hintere Stützphase vor allem zur Entwicklung eines optimalen Abdrucks (Marquardt, 2012).

Auch bei Ounpuu (1989) und Novacheck (1998) lässt sich eine funktionale Zweiteilung der Stützphase finden. Im Einklang mit Bauersfeld und Schröter (1985) wird in eine Amortisationsphase und eine Abdruckphase (generation phase) unterteilt. Diese Phasen werden jedoch bei ihnen noch weiter in foot contact, mid stance und toe off untergliedert. Die Stützphase und somit auch die Amortisationsphase werden durch den initialen Bodenkontakt (foot contact) eingeleitet. Der Übergang von Amortisationsphase zu Abdruckphase wird durch die mittlere Stützphase (mid stance) beschrieben und der Abstoß (toe off) kennzeichnet das Ende der Abdruckphase und somit auch das Ende der Stützphase.

Neben den verschiedenen Phasen-Modellen zur Beschreibung des Laufzyklus gibt es weitere Begriffe beziehungsweise Parameter um die biomechanischen Abläufe der Stützphase und des Laufzyklus zu beschreiben. Untenstehend werden diejenigen Parameter, die für diese Arbeit relevant sind, kurz definiert.

Zeit-Distanzparameter. Die Zeit vom initialen Bodenkontakt bis zum Abheben des Fusses über die Zehen wird in der Biomechanik als *Stützzeit* definiert. Diese wird in Sekunden angegeben. Die Schrittzahl in einer gewissen Zeit wird als *Kadenz* bezeichnet und in Schritte pro Minute angegeben.

1.1.2 Bewegungsstruktur Laufen. Wie bereits beschrieben ist der Beginn des Gangzyklus durch das Aufsetzen des Fusses und somit der Amortisation der Last gekennzeichnet. Die meisten Läufer kommen dabei im Bereich der zwei hinteren Drittel des Fusses auf (Nova-check, 1998). Nach dem initialen Bodenkontakt wird das obere Sprunggelenk bis in die Phase der mittleren Stützphase dorsalflexiert gefolgt von einer Plantarflexion bis zum Abstoss. Durch den initialen Bodenkontakt erfolgt im unteren Sprunggelenk eine Eversionsbewegung. Während der mittleren Stützphase ist das untere Sprunggelenk maximal evertiert und wird im Anschluss bis zum Abstoss invertiert (Ferber & McDonald, 2014). Es wird angenommen, dass eine stark ausgeprägte Eversion in Kombination mit einer Vorfussabduktion und einer Dorsalflexion zu erhöhter Zugbeanspruchung der Achillessehne führt und somit einen Überlastungsschaden dieser Struktur begünstigt (Mayer et al., 2000).

Das Kniegelenk befindet sich zum Zeitpunkt des initialen Bodenkontaktes in einer Flexion, welche ihren Peak während der mittleren Stützphase zwischen 36 % und 45 % der Stützphase erreicht. Neben der Flexionsbewegung im Kniegelenk wird dieses zusätzlich adduziert und nach innen rotiert. Während der zweiten Hälfte der Stützphase findet durch die Extension im Kniegelenk eine Aussenrotation des Kniegelenkes statt (Ferber & McDonald, 2014). Eine vermehrte Innenrotation des Kniegelenks während der mittleren Stützphase wird mit dem Patellofemorale Schmerzsyndrom in Verbindung gebracht (Barton et al., 2012; Ferber & McDonald, 2014). Zudem steht eine erhöhte Kniestreckung während des initialen Bodenkontaktes mit erhöhten Abbremskräften in Zusammenhang, was die Belastung für den passiven Bewegungsapparat erhöht und somit zu einem gesteigerten Risiko einen Überlastungsschaden zu erleiden führt (Gerritsen, van den Bogert & Nigg 1995).

Neben der Flexion im Sprung- und Kniegelenk ist auch die Hüfte beim initialen Bodenkontakt flexiert und bleibt in dieser Position für die ersten 30-40 % der Stützphase. In den restlichen 60 % der Stützphase wird die Hüfte allmählich extendiert, bis sie beim Abstoss annähernd maximal extendiert ist. Das Becken ist während des initialen Bodenkontaktes leicht nach hinten gekippt (Tilt) und wird anschliessend nach vorne gekippt. Mit dem initialen Bodenkontakt wird die Hüfte relativ zum Becken adduziert. Dies führt zu einer Senkung des Beckens (Obliquity) auf der gegenüberliegenden Seite. Die Rotationsbewegung der Hüfte zeigt beim initialen Bodenkontakt und während den ersten 20 % der Stützphase eine leichte Innenrotation und wird anschliessend während der restlichen Phase nach aussen rotiert (Ferber & Mac-

donald, 2014). Ein zu starkes Vorkippen des Beckens während der Stützphase kann ein Hinweis auf eine Schwäche der Gesässmuskulatur sein. Eine Schwäche der Adduktoren oder der Abduktoren der Hüfte kann zu einem verstärkten seitlichen Abkippen des Beckens (Obliquity) führen (Nicola & Jewison, 2012). Wie bereits in Zusammenhang mit der erhöhten Knieinnenrotation beschrieben wird auch eine erhöhte Hüftadduktion in Verbindung mit dem Patellofemoralen Schmerzsyndrom gebracht (Barton et al., 2012; Ferber & McDonald, 2014).

Allgemein kann gesagt werden, dass die Bewegungen der Sagittalebene deutlich ausgeprägter sind, als die Bewegungen der Transversal- und der Frontalebene. Die Bewegungen in der Frontal- und Transversalebene dienen vor allem dazu, die Bewegungen des Oberkörpers gering zu halten beziehungsweise um effizienter zu laufen (Dicharry, 2010). Das Ausmass der Gelenkwinkel wird massgebend durch den Laufstil und die Lauftechnik beeinflusst (Neumann & Hottenrott, 2010). Es gibt dabei keine richtige oder falsche Technik, vielmehr geht es darum, eine möglichst optimale Bewegungsausführung zu erlangen, um effizient zu laufen. Effizientes Laufen geht eng mit einer ökonomischen Laufbewegung einher. Für diese Arbeit wird dabei lediglich auf letzteres kurz eingegangen. Mit einer ökonomischen Bewegungsausführung ist diejenige Bewegungsausführung gemeint, welche den geringsten energetischen Aufwand für den Läufer mit sich bringt (Hömke, 2009). Wie hoch der energetische Aufwand eines Läufers ist, wird unter anderem durch «bewegungsabhängige» und «bewegungsunabhängige Einflussfaktoren» unterschieden (Simon, 1998, S.35). Als bewegungsunabhängiger Faktor zählt beispielsweise der nicht vorhandene Luftwiderstand auf dem Laufband. Kinematische Veränderungen und somit auch der Einfluss der Ermüdung, welche für diese Arbeit zentral ist, wird angenommen spielt als bewegungsabhängiger Faktor ebenfalls eine Rolle wird von ökonomischem Laufen gesprochen.

1.1.3 Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus. Die beschriebenen Bewegungsabläufe sind das Ergebnis des Zusammenspiels verschiedener Muskeln. Neben der Aufgabe der Bewegungsausführung hat die Muskulatur eine weitere wichtige Funktion. Durch das Laufen erfährt der Körper repetitive vertikale Kräfte, welche dem dreifachen des Körpergewichtes entsprechen können (Lieberman et al., 2010). Wie bereits eingängig erwähnt ist die Muskulatur hauptsächlich dafür verantwortlich, diese Belastungsspitzen auf das Bewegungs- und Stützsystem abzubremesen (Radin, 1986). Bevor ich im Anschluss auf die Ermüdungsthematik und die dadurch entstehenden Veränderungen der Bewegungsstruktur beim Laufen eingehe, wird in die-

sem Zusammenhang ein kurzer Überblick über die Arbeitsweise der Muskulatur während des Laufens gegeben.

Die Muskulatur arbeitet während des Laufens in einem Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVZ). Durch das Einwirken äusserer Kräfte (z.B. Gravitationskraft) werden die Muskeln gedehnt. So wird beispielsweise während der Amortisationsphase die vordere Oberschenkelmuskulatur gedehnt und wirkt in Folge dessen abbremsend. In dieser Dehnungsphase arbeitet die Muskulatur exzentrisch, gefolgt von einer konzentrischen (Verkürzungs-) Aktion. Die Definition einer exzentrischen Aktion impliziert, dass die Muskulatur während der Dehnung aktiv ist (Nicol, Avela & Komi, 2006). Diese Kombination von exzentrischer und konzentrischer Arbeitsweise wird als DVZ beschrieben (Cavanagh & Komi, 1979). Während der exzentrischen Phase wird durch die Dehnung des Muskel-Sehnen-Komplexes elastische Energie gespeichert, welche in der darauffolgenden konzentrischen Phase wieder freigesetzt wird, was zu einer erhöhten Kraftfähigkeit während dieser Phase führt. Dieses Phänomen wird als elastische Leistungspotenzierung bezeichnet (Nicol, Avela & Komi, 2006). Neben der Speicherung von elastischer Energie während der Dehnungsphase, trägt auch das Auslösen von Dehnungsreflexen zu einer erhöhten Leistungspotenzierung bei (Neumann & Hottenrott, 2016). Um den DVZ wirksam zu nutzen wird vorausgesetzt, dass die Muskulatur bereits vor dem Aufsetzen des Fusses am Boden aktiviert ist und die Dehnungsphase kurz und schnell erfolgt (Komi, 2000). Diese Vorinnervation sorgt für eine optimale Muskelsteifigkeit, damit der Muskel der Dehnung kurzzeitig widerstehen kann und bereitet den Muskel-Sehnen-Komplex auf die bevorstehende Belastung vor (Hömke, 2009).

1.2 Ermüdung

Allgemein erwiesen ist, dass körperliche und geistige Aktivität zu Ermüdung führen. In der Literatur wird der Ermüdungsbegriff jedoch nicht einheitlich diskutiert. Unterschiede ergeben sich unter anderem bezogen auf den Zeitpunkt, wann Ermüdung eintritt. Edwards (1981) definierte Ermüdung als «failure to maintain the required or expected force» (S. 1). Diese Definition lässt vermuten, dass Ermüdung sehr abrupt, mit dem Zeitpunkt, zu dem eine geforderte oder erwünschte Kraft nicht mehr aufrecht erhalten werden kann, eintritt (Boyas & Guével, 2011). Allerdings werden neurophysiologische Mechanismen, weit bevor der Körper die Effekte von Ermüdung spürt, beeinträchtigt. Zudem treten bereits mit Beginn von körperlicher Aktivität Veränderungen von physiologischen Prozessen ein. Infolgedessen definierten Bigland-Ritchie und Woods (1984) Ermüdung «as any reduction in the force generating capaci-

ty of the total neuromuscular system regardless of the force required in any given situation» (S. 691). Ermüdung ist also nicht einfach der Endpunkt einer Belastung, sondern entwickelt sich mit Beginn einer körperlichen Aktivität und steigt danach graduell an (Boyas & Guével, 2011; Enoka & Duchateau, 2008). Wird Ermüdung mit einem Belastungsabbruch gleichgesetzt, wie es aus der Definition von Edwards (1981) hervorgeht, wird bei einigen Autoren auch der Begriff «Erschöpfung» verwendet (Gandevia, 2001; Schmidt, Lang, & Heckmann, 2011). Bis zum Zeitpunkt, an dem eine Belastung abgebrochen werden muss, versucht der Körper die Ermüdung durch verschiedene Mechanismen zu kompensieren, dabei zeigt sich eine instabile aber reversible Bewegungsausführung. In diesem Zusammenhang wird von kompensierbarer Ermüdung gesprochen (Hottenrott & Hoos, 2003).

1.2.1 Periphere und zentrale Ermüdung. Eine weitere Unterscheidung in der Ermüdungsdefinition wird auf Grund der Lokalisation, wo Ermüdung eintritt vorgenommen. Hierbei lassen sich periphere und zentrale Ermüdung unterscheiden (Gandevia, 2001). Bei der peripheren Ermüdung handelt es sich um Veränderungen auf muskulärer Ebene. Unter anderem wird eine durch Überlastung der Muskulatur hervorgerufene Hemmung des Energiestoffwechsels dafür verantwortlich gemacht (Klinke, Pape, Kurtz & Silbernagel, 2010). Die zentrale Ermüdung ist gekennzeichnet durch Veränderungen von Strukturen und Prozessen des zentralen Nervensystems. Charakteristisch für die zentrale Ermüdung sind unter anderem die Abnahme der Koordinationsfähigkeit, gestörte Aufmerksamkeit, eine Abnahme der körperlichen und sensorischen Leistungsfähigkeit sowie verlängerte Reaktionszeit. Es wird angenommen, dass die Formatio reticularis und die motorische Grosshirnrinde dafür verantwortlich sind und dass Monotonie und fehlende Motivation einen grossen Einfluss auf die Entstehung zentraler Ermüdung haben (Klinke, Pape, Kurtz & Silbernagel, 2010). Beide Ermüdungsformen beeinflussen sich gegenseitig und stehen in engem Zusammenhang miteinander (Platonov, 1999). In diesem Zusammenhang betont Enoka (1995), dass die Art der Belastung einen grossen Einfluss darauf hat, inwieweit periphere und zentrale Faktoren zu Ermüdung beitragen. Die Ursachen, welche zu Ermüdung führen sind bis heute jedoch nicht abschliessend geklärt. Einfacher ist es, das Vorliegen von Ermüdung nachzuweisen.

1.2.2 Laufen und Ermüdung. Untersuchungen haben ergeben, dass Ermüdung bei Belastungen im Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus die Muskel- und Gelenksmechanik sowie die Muskelsteifigkeit (Stiffness) und die Reflexinnervation beeinflusst (Komi, 2000). Durch eine Reduktion des neuronalen Inputs zum Muskel wird die maximale Kraftfähigkeit der Muskulatur beeinträchtigt und es kann zu einer Reduktion des Transfers von gespeicherter Energie zwischen exzentrischer und konzentrischer Kontraktion kommen (Mizrahi, Verbitsky & Isakov, 2000), zusammen mit einer verminderten Reflexaktivität der Muskulatur und einem Verlust der optimalen Stiffness- Regulation (Hottenrott, Hoos & Sommer, 2001; Mizrahi, Verbitsky & Isakov, 2001; Komi, Hyvärinen, Gollhofer & Mero, 1986).

Nicol, Komi & Marconnet (1991) zeigten, wie sich die Ermüdung eines Marathonlaufes auf die Kraft- und Ausdauerleistungsfähigkeit der Beinmuskulatur auswirkt. Dazu absolvierten die Probanden vor und nach einem Marathonlauf einen maximalen isometrischen Kraft- und Ausdauer- test der Beinextensoren. Dabei wurden das maximale Drehmoment des Krafttestes und die Dauer, wie lange eine isometrische Belastung bei 60 % der maximal willentlichen Kraft gehalten werden konnte, vor und nach dem Marathonlauf verglichen. Die Resultate der Post-Tests zeigten eine signifikante Reduktion des maximalen Drehmomentes für den isometrischen Krafttestes sowie eine reduzierte Dauer die gegebene Belastung während des isometrischen Ausdauer- tests zu halten. Neben der reduzierten Leistungsfähigkeit der Muskulatur zeigt sich unter Ermüdung auch eine Veränderung der elektromyografischen Aktivität. Dazu untersuchten Hottenrott, Hoos, und Sommer (2001) mittels elektromyografischen Messungen die Muskelaktivität der Beinextensoren und Beinflexoren während eines Laufes. Die Untersuchungen ergaben eine deutlich höhere Aktivität der Beinextensoren mit zunehmender Laufdauer. Bei den Beinflexoren zeigte sich hingegen keine Veränderung der Aktivität. Die Muskulatur, welche für Streckbewegungen verantwortlich ist wird demnach unter Ermüdung stärker beansprucht als die Muskulatur für die Beugebewegungen.

Wie bereits eingangs erwähnt, hat die Muskulatur eine wichtige protektive Aufgabe während des Laufens. Durch die verminderte Toleranz der Muskulatur gegenüber dem DVZ und die veränderte muskuläre Aktivität ist diese schützende Funktion der Muskulatur nicht mehr vollständig gegeben. Nachlassende Stabilität und Kraft führen zu abweichender Bewegungsstruktur und gewünschte Gelenkwinkel können nicht mehr erzielt werden, was zu einer erhöhten Belastung des Bewegungs- und Stützsystems und somit zu einem erheblich gesteigerten Risiko für Überlastungsschäden führt (Dierks, Davis & Hamill, 2010; Hottenrott & Hoos, 2003.; Komi, 2000).

1.3 Ermüdung und kinematische Veränderungen während des Laufens

Die Effekte von Ermüdung hinsichtlich der Veränderung von Gelenkwinkeln der unteren Extremitäten wurden bereits mehrfach untersucht. Auf Grund der uneinheitlichen Ermüdungsprotokolle sind die Befunde zu kinematischen Veränderungen der unteren Extremitäten jedoch Teils widersprüchlich (Mattes, Hazza Walaa Eldin & Manzer, 2014).

Infolge hoher Aktivität der Dorsal- und Plantarflexoren während des Laufzyklus (Reber, Perry & Pink, 1993), wurde der Effekt lokaler Ermüdung dieser Muskelgruppen auf die Gelenkskinematik während des Laufens bereits mehrfach untersucht. Anhand isometrischer Kontraktionen wurden bei Christina, White und Gilchrist (2001) die Dorsalflexoren und die Invertoren und bei Kellis und Liassou (2009) die Dorsal- und Plantarflexoren lokal ermüdet. Beide Untersuchungen ergaben nach lokaler Ermüdung der Dorsalflexoren beziehungsweise Plantarflexoren eine signifikant höhere Plantarflexion während des ersten Bodenkontaktes und während der mittleren Stützphase. Die Ermüdung der Invertoren führte jedoch zu keinen signifikanten kinematischen Veränderungen. Bei Christina et al. (2001) konnten zudem keine Auswirkungen auf die Kinematik des Knie- und Hüftgelenks nachgewiesen werden. Kellis und Liassou (2009) fanden hingegen eine um 3° erhöhte Knieflexion während des initialen Bodenkontaktes. Neben der lokalen Ermüdung der Dorsal- und Plantarflexoren wurden bei Kellis und Liassou (2009) zudem die Effekte lokaler Ermüdung der Kniebeuge- und Streckmuskulatur auf die Kinematik des Laufens untersucht. Dieses Ermüdungsprotokoll führt zu einer erhöhten Knieflexion während der Abdruckphase. Neben der stärkeren Knieflexion wurde auch eine erhöhte Hüftextension während der Abdruckphase verzeichnet.

Derrick, Dereu und Mc Lean (2001) untersuchten die kinematischen Veränderungen während eines Laufes bis zur maximalen Erschöpfung. Um die Geschwindigkeit für den Laufbandtest zu ermitteln, absolvierten die Läufer einen 3200 m-Lauf eine Woche vor dem Testtag. Die durchschnittliche Geschwindigkeit wurde als Geschwindigkeit für den maximalen Erschöpfungslauf herbeigezogen. Am Testtag liefen die Läufer eine durchschnittliche Zeit von ungefähr 16 Minuten. Dieses Protokoll ergab eine um 4.4° signifikant höhere Knieflexion während des initialen Bodenkontaktes sowie eine um 3.8° erhöhte maximale Knieflexion während der mittleren Stützphase. Zudem nahm die Rückfussinversion beim initialen Bodenkontakt mit zunehmender Ermüdung um 1.4° signifikant zu. Während der mittleren Stützphase nahm hingegen die maximale Eversion des Rückfusses mit 1° leicht zu. Auch Abt et al. (2011) untersuchten die kinematischen Veränderungen auf Grund eines maximalen Erschöpfungslaufes.

Im Gegensatz zu Derrick, Dereu und Mc Lean (2001) wurden bei ihnen professionelle Läufer rekrutiert und die Geschwindigkeit für den Laufbandtest anhand eines $\text{VO}_2 \text{ max}$ Testes ermittelt. Nach einem kurzen Aufwärmen wurde die Laufbandgeschwindigkeit solange erhöht, bis die Herzfrequenz der Läufer die vorher ermittelte anaerobe Schwelle erreicht hat. Anschließend wurden erst die kinematischen Daten festgehalten und der Lauf wurde bei konstanter Geschwindigkeit bis zur maximalen Erschöpfung gelaufen. Die Gesamtdauer des Laufes lag im Durchschnitt mit 17.8 Minuten etwas höher als bei Derrick, Dereu und Mc Lean (2001). Abt et al. fanden keine signifikanten Unterschiede zwischen Beginn und Ende des Erschöpfungslaufes. Abt et al. begründen die Resultate auf Grund der kurzen Belastungsdauer und der hohen Intensität. Die hohe Intensität des Belastungslaufes führte zu einer starken Belastung des kardiovaskulären Systems und der Lauf musste bereits nach kurzer Zeit abgebrochen werden bevor Veränderungen auf Grund von Ermüdung des neuromuskulären Systems ersichtlich wurden. Dass Derrick, Dereu und Mc Lean trotz ähnlicher Laufdauer und ähnlicher Intensität dennoch Veränderungen zwischen unermüdetem und ermüdetem Zustand fanden erklären sie sich auf Grund der unterschiedlichen Messzeitpunkte während des Laufes. Während bei Derrick, Dereu und Mc Lean (2001) direkt bei Laufbeginn die ersten Daten erhoben wurden, haben Abt et al. (2011) wie beschrieben die erste Aufnahme erst durchgeführt als die Herzfrequenz der Läufer die anaerobe Schwelle erreicht hatte.

Vor dem Hintergrund, dass eine Belastung durch lokale Ermüdung sowie ein maximaler Erschöpfungslauf keine «natürliche» Ermüdung beziehungsweise Trainingseinheit widerspiegeln, untersuchten Dierks, Davis und Hamill (2010) die kinematischen Veränderungen der unteren Extremitäten während eines Laufes der eine typische Trainingseinheit repräsentieren sollte. Wie bereits bei Derrick, Dereu und Mc Lean (2001) waren die Läufer dieser Studie ebenfalls Freizeitläufer. Die Läufer liefen bei einer selbst gewählten Geschwindigkeit bis entweder ihre Herzfrequenz 85 % ihrer maximalen Herzfrequenz erreichte oder sie einen Wert von 17 auf der rating of perceived exertion Skala angaben. Nach einer durchschnittlichen Laufzeit von 45 Minuten zeigte sich eine signifikante Zunahme der maximalen Rückfussversion um 2.5° sowie eine um 2.3° signifikant erhöhte Tibiainnenrotation während der mittleren Stützphase. Zudem fanden sie eine leicht erhöhte Hüft- und Knieadduktion während der mittleren Stützphase, welche jedoch statistisch nicht signifikant waren.

1.4 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Studie ist es, kinematische Veränderungen unter zunehmender Ermüdung bei regelmässig trainierenden Läufern während eines submaximalen Belastungslaufes zu untersuchen. Einerseits sollen diese Veränderungen in den Kontext zu den bisherigen Studien zwischen unermüdetem und ermüdetem Zustand gesetzt werden und andererseits soll untersucht werden, zu welchem Zeitpunkt diese Veränderungen eintreten.

1.5.1 Kinematische Veränderungen zwischen Beginn und Ende des Laufes. Durch den ermüdungsbedingten Verlust der Muskelsteifigkeit gehe ich davon aus, dass vor allem während des initialen Bodenkontaktes die grössten Veränderungen ersichtlich werden. Bezogen auf die Gelenkwinkel ist anzunehmen, dass durch die hohe Aktivität während des Laufens der Dorsal- und Plantarflexoren vor allem im Bereich des Fusses Veränderungen der Bewegungsstruktur ersichtlich werden. Gemäss der Literatur wird erwartet, dass die Plantarflexion sowie die Eversion und die Fussabduktion zunehmen. Auf Grundlage der Studie von Hottenrott, Hoos, und Sommer (2001) zur Muskelaktivität wird angenommen, dass durch die stärkere Beanspruchung der Streckmuskulatur unter Ermüdung die Extensionsbewegungen geringer ausfallen werden. Zudem ist anzunehmen, dass sowohl die maximale Knieinnenrotation und die maximale Hüftadduktion zunehmen, da beide Parameter in Zusammenhang mit Ermüdung und Überlastungsschäden diskutiert werden (Barton et al., 2012; Dierks, Davis & Hamill, 2010; Ferber & McDonald, 2014).

1.5.2 Kinematische Veränderungen zwischen den Messzeitpunkten. Die Begründung von Abt et al. (2011) lässt darauf schliessen, dass kinematische Veränderungen vor allem während längeren Läufen ersichtlich werden. Es wird daher vermutet, dass die Veränderungen vor allem zwischen den letzten Messzeitpunkten signifikant ausfallen werden und die meisten Veränderungen im späteren Verlauf des Laufes auftreten werden.

2 Methode

2.1 Probanden

Die Probanden wurden über die Webseite des Basel Running Clubs und durch persönliche Anfragen rekrutiert. 20 männliche Läufer zwischen 18 und 52 Jahren wurden für die Studie selektionniert. Alle Teilnehmer waren Langstreckenläufer und seit mindestens 2 Jahren läuferisch aktiv. Keiner der Läufer litt an einer kardiovaskulären Erkrankung, einer Pathologie der unteren Extremitäten oder trug orthopädische Einlagen. Ferner wies keiner der Teilnehmer Verletzungen der unteren Extremitäten in den vergangenen sechs Monaten oder vorhergehende Verletzungen auf, welche das Gangbild in irgendeiner Weise beeinflussen könnten. Vor der Untersuchung wurden von allen Probanden eine Checkliste, sowie eine Einwilligungserklärung der Ethikkommission Nordwestschweiz ausgefüllt und unterzeichnet.

2.2 Protokoll

Um Aufschlüsse über kinematische Veränderungen unter zunehmender Belastung zu erhalten wurde das Laufbild von 20 läuferisch trainierten Probanden während eines submaximalen Belastungslaufes auf dem Laufband zu jeweils vier Messzeitpunkten analysiert. Das Laufband wurde gewählt, um eine standardisierte Auswertung zu erhalten. Um die Intensität für den Belastungslauf zu definieren, absolvierten die Probanden vorgängig einen modifizierten Rampentest gefolgt von einer Erholungspause. Kindermann et al. (2004) geben an, dass die anaerobe Schwelle in Abhängigkeit von der Sportart und dem Trainingszustand zwischen 60 - 85 % der maximalen Intensität der Vo_2max liegt. Daher wurde die Intensität für den Belastungslauf bei 75 % der individuellen maximalen Leistungsfähigkeit angesetzt. Die Messdauer wurde in Anlehnung an das Protokoll von Dierks, Davis und Hamill (2010) auf 42 Minuten begrenzt.

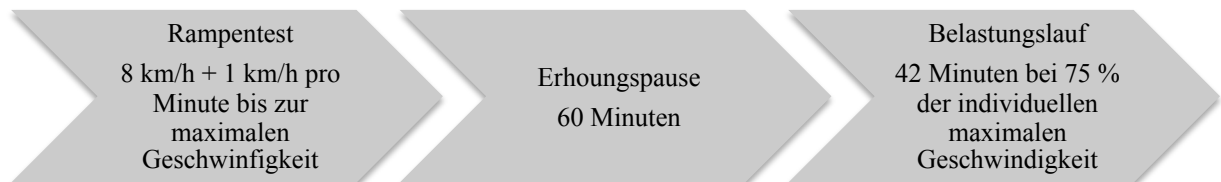


Abbildung 6. Schematische Darstellung der drei Teile der Untersuchung.

2.2.1 Rampentest. In Anlehnung an gängige VO₂max Protokolle wurde der Rampentest zur Ermittlung der maximalen Laufgeschwindigkeit auf dem Laufband entwickelt. Die Geschwindigkeit wurde konstant erhöht, bis der Proband sein Maximum erreichte und abbrechen musste. Eine Ausbelastung sollte nach 8-12 Minuten erfolgen (Tanner & Gore, 2013).

Nach einem kurzen Einlaufen (2 Minuten bei 7 km/h) wurde der Rampentest bei 8km/h gestartet und pro Minute konstant um 1km/h erhöht. Die Steigung blieb während der ganzen Testdauer unverändert (1 % Steigung). Zusätzlich wurde die Herzfrequenz gemessen und die maximale Herzfrequenz beim Testabbruch als Referenz für den Belastungstest notiert.

2.2.2 Erholungspause. Um die Erholungsdauer zwischen dem Rampentest und dem Belastungslauf zu definieren wurde in einer Pilotuntersuchung bei einem Probanden vor dem Rampentest sowie direkt nach dem Rampentest und alle weiteren 10 Minuten die Blutlaktatkonzentration entnommen. Der Ruhelaktatwert lag vor der Belastung bei 1.93 mmol/L und wies einen Wert von 13.47 mmol/L direkt nach dem Rampentest auf. Nach einer Ruhepause von 60 Minuten lag der Wert noch bei 1.81 mmol/L und der Belastungslauf wurde angesetzt.

2.2.3 Belastungslauf. Um die kinematischen Daten während des Laufes zu erfassen wurden den Probanden während der Ruhepause insgesamt 33 reflektierende Marker angebracht. Davon wurden sieben Marker am Oberkörper, vier Marker am Becken, elf Marker an der rechten unteren Extremität und elf Marker am Fuss angebracht (vgl. Tabelle unten).

Tabelle 1

Markerpositionen mit den Bezeichnungen in Klammern

Thorax	Halswirbel (C7)
	Brustwirbel (T10)
	Juglum (CLAV)
	Untere Spitze Sternum (STRN)
	Schulterblatt rechts (RBAK), Linkes und rechtes Schultergelenk (LSHO/RSO)
Pelvis	Spina iliaca anterior superior links und rechts (LASI/RASI)
	Spina iliaca posterior superior links und rechts (LPSI/RPSI)
Untere Extremität rechts	Trochanter (RTRO)
	Oberschenkel-Cluster (RThigh 1-4)
	Kniespalt lateral und medial (RKNE/LKNE)
	Fibulaköpfchen (RHFI)
	Tuberositas Tibia (RTUB)
	Mitte der Tibia vorne ca. 50 % der Unterschenkelhöhe (RMTI)
Fuss rechts	Unteres Drittel der Tibia (RLFI)
	Ansatz Achillessehne (RHEH)
	Calcaneus posterior (RHEE)
	Lateraler und medialer Malleolus (RMAL/RMAM)
	Lateraler und medialer Calcaneus (RCAL/RCAM),
	Basis der Metatarsale 5 und 1 (RBA5/RBA1)
	Kopf der Metatarsale 1, 2 und 5 (RHE1, RHE2 und RHE5)

Anmerkung. Die linke Spalte enthält die verschiedenen Körperregionen und in der rechten Spalte sind die Markerpositionen ersichtlich.

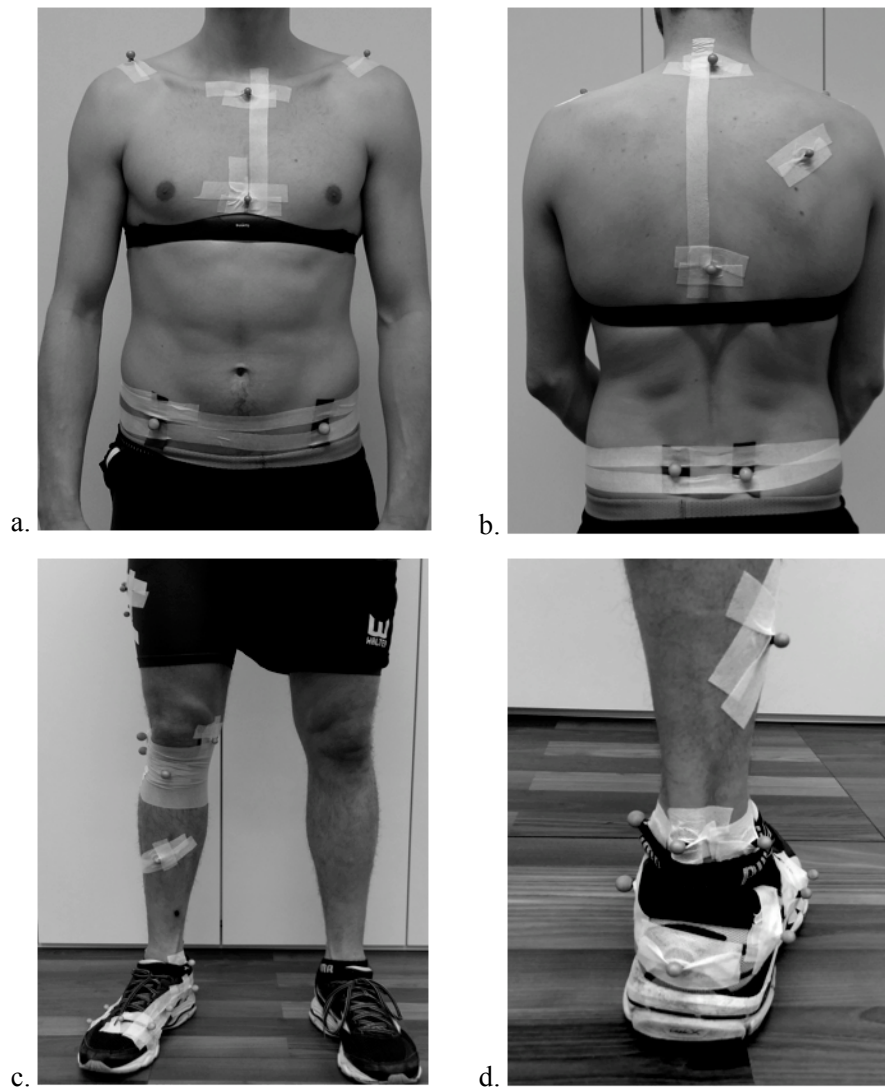


Abbildung 7. Für a-b: Markerpositionen des Thorax und des Pelvis und c-d: Markerpositionen der rechten unteren Extremität und des Fußes

Die rechte untere Extremität wurde zufällig gewählt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Beindominanz auf kinematische Variablen kaum einen Einfluss nimmt (Brown, Zifchock, & Hillstrom, 2014). Zu Beginn der Messung wurde eine statische Aufnahme in aufrechter Haltung der Probanden aufgezeichnet. Diese Aufnahme diente als Referenz für die dynamischen Aufnahmen der Laufbewegung. Zur Bestimmung der Gelenkszentren und der Gelenksachsen wurde zusätzlich ein Basic Motion Task nach List (2005) ausgeführt. Dabei wurde das gestreckte rechte Bein mehrere Male nach vorne und hinten geschwungen und auf die Seite abgehoben.

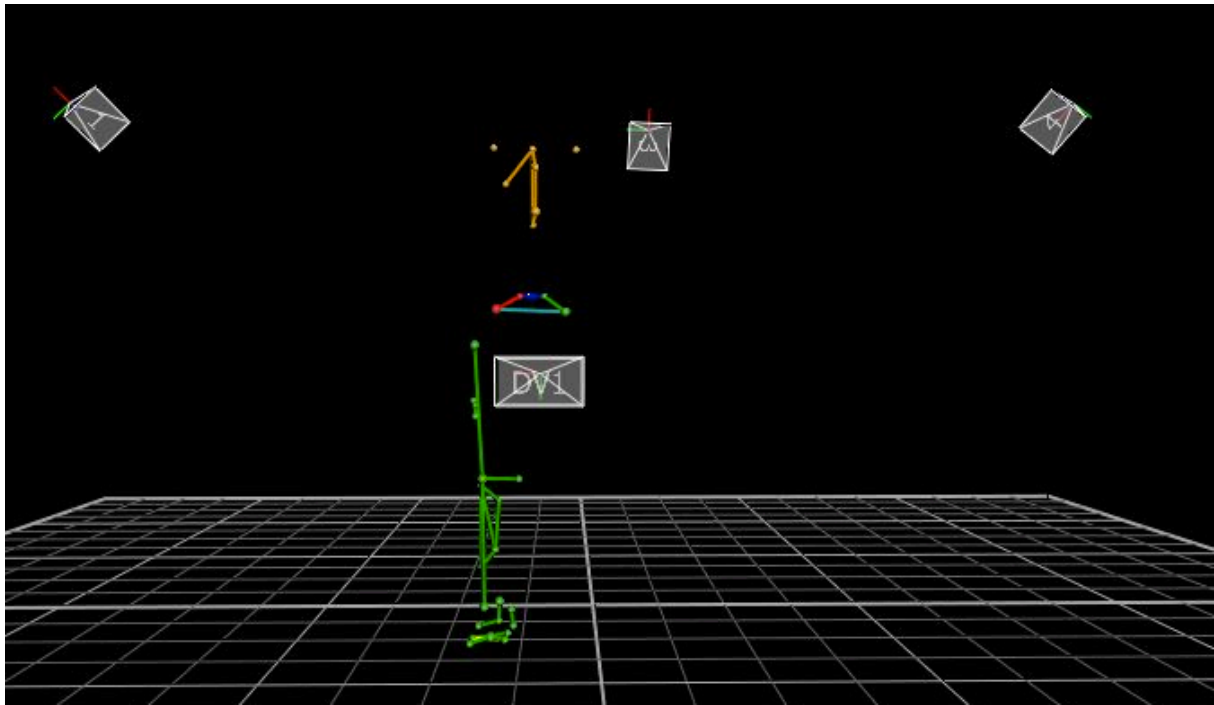


Abbildung 8. Beispiel einer kalibrierten statischen Aufnahme eines Probanden im Raum.

Anschliessend liefen die Probanden auf dem Laufband den Belastungslauf. Die kinematischen Daten wurden an vier Messzeitpunkten über zehn Schrittzyklen erhoben. Der Beginn des Belastungslaufes wurde als Messzeitpunkt 1 (m1) festgelegt. Folgend wurden Messungen in der 14., 28. und 42. Minute erhoben, welche als m2, m3 und m4 definiert wurden. Um den Verlauf der Ermüdung zu dokumentieren, wurde zu allen Messzeitpunkten das subjektive Belastungsempfinden anhand der Borgskala erfragt und die Herzfrequenz notiert.

2.3 Messinstrumente

Die Messung zur Erhebung der maximalen Geschwindigkeit wurde auf einem Pulsar® 3p Laufband von h/p/cosmos durchgeführt. Anhand eines Pulsgurtes (Polar WearLink Brustband mit Polar WIND Transmitter) und eines im Laufband integrierten Recievers (Polar WIND) wurde die maximale Herzfrequenz aufgezeichnet. Der Belastungslauf wurde auf einem Zebris FDM-T Laufband mit einer Lauffläche von 150cm x 50cm durchgeführt. Die Kinematik wurde anhand von 8 3D Vicon Vantage Kameras (Modell V5) mit einer Messfrequenz von 200 Hz und 2 2D Vicon Bonita Videokameras (Modell 720c) mit einer Messfrequenz von 100 Hz des Vicon Systems UK erfasst. Mittels eines Suunto Pulsgurtes und einer Suunto Pulsuhr vom Modell t6 wurde die Herzfrequenz während des Belastungslaufes aufgezeichnet.

2.4 Datenanalyse

Die Datenanalyse bezieht sich ausschliesslich auf die erhobenen Daten während des Belastungslaufes. Um die kinematischen Daten nach dem Lauf zu analysieren, wurde die Vicon Nexus Software zur Auswertung der Gelenkwinkel benutzt und zur Visualisierung der ausgewerteten Winkel die Vicon Polygon Software.

2.4.1 Nexus. Auf Grund ungenügender Daten von drei Probanden wurden diese zur weiteren Verarbeitung ausgeschlossen. Die erfassten Daten der übrigen 17 Probanden der 3D-Kameras wurden mit der Vicon Nexus Software (Version 2.3) verarbeitet. Dazu wurde ein auf dem GOLEM-Modell basierendes Modell für diese Studie programmiert. Das Hüftgelenkszentrum wurde mit Score & SARA (eine Prozedur aus Nexus) und den aufgenommenen Daten aus dem Basic-Motion-Task berechnet. Der Fuss wurde komplett neu für die Studie geschrieben. Anschliessend wurden die Markerdaten durch die Software rekonstruiert und manuell markiert. In der Nachbearbeitung wurden die Aufnahmen der Schrittzyklen auf minimal fünf Schrittzyklen zugeschnitten. Diese Daten wurden ebenfalls durch die Software rekonstruiert und automatisch markiert. Wurden Marker falsch markiert, wurden diese manuell bestimmt. Lücken wurden mit einem Woltring-Filter (Spline, Pattern Fill oder Rigid Body Fill) gefüllt. Nicht markierte Marker wurden gelöscht und die Daten wurden gefiltert (Woltring, Filter Mode MSE). Um die Stützphase zu definieren, wurden die Events (foot contact und toe off) anhand der 2D Bilder für einen Schritt jeder Aufnahme manuell gesetzt und nachfolgend mit einer Autokorrelation-Operation für alle weiteren Schritte automatisch durch das Programm festgelegt. Die Winkel wurden in allen drei Ebenen für das Hüftgelenk (Femur in Bezug zur Pelvis), das Kniegelenk (Femur in Bezug zur Tibia), den Fuss (Tibia in Bezug zum Fuss) und das Becken (Pelvis in Bezug zum globalen Koordinatensystem) berechnet. Die Berechnung des Hüftgelenkwinkels, des Knie- und Fussgelenkwinkels wurden anhand zwei lokaler Koordinatensysteme berechnet. Die Berechnung des Beckenwinkels erfolgte anhand eines lokalen Koordinatensystems und des globalen Koordinatensystems. Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Berechnungen ist dem Anhang zu entnehmen. Neben der Erfassung der Bewegungen wurden durch Nexus zusätzlich die Kadenz sowie die Stützzeit berechnet.

2.4.3 Polygon. Die Visualisierung der 3D- Daten erfolgte durch die Vicon Polygon Software (Version 3.5) Die Standphase wurde für jede Aufnahme zeitlich von 0 bis 100 % der Stützphase genormt. Anschliessend wurden die Daten in ein Excel-File (Office 2010) exportiert um diese mit Matlab (R2014b) weiter auszuwerten.

2.4.4 Matlab. Alle Daten der Probanden ($n=17$) wurden einzeln für jeden Messzeitpunkt in Matlab eingelesen. Folgende kinematische Parameter wurden für die weitere Analyse verwendet: maximale Winkelposition während der Phase des initialen Bodenkontaktes (erste 10 % der Stützphase), während der mittleren Stützphase (10 - 60 % der Stanphase) und während der Abdruckphase bis zum Abheben des Fusses (letzten 40 % der Standphase).

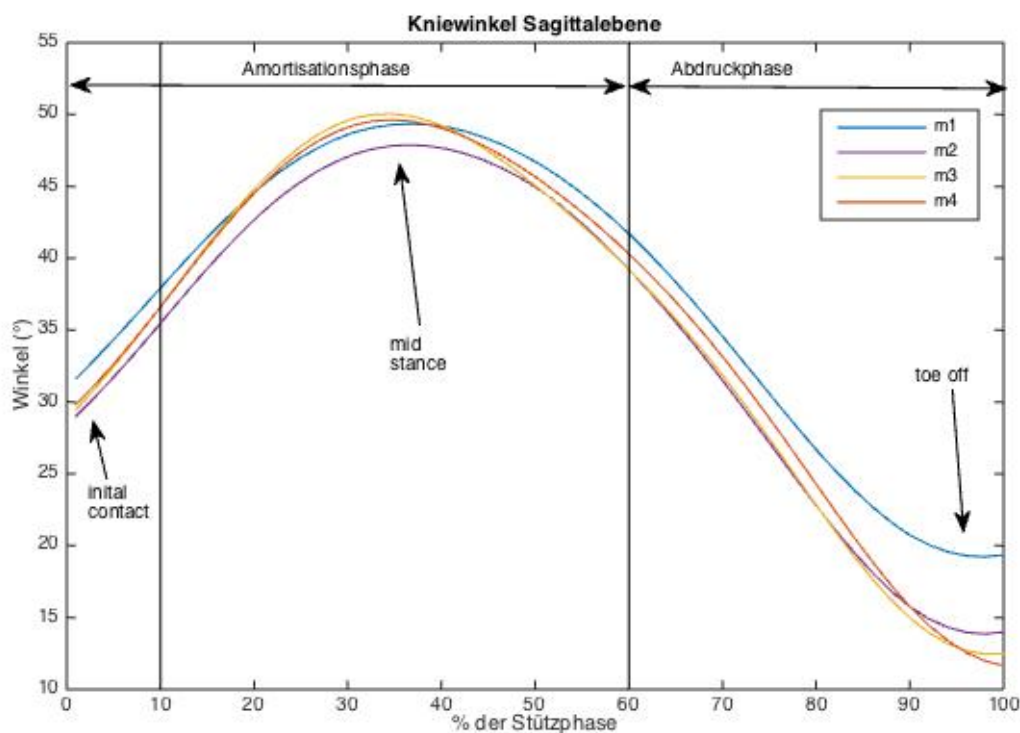


Abbildung 9. Beispiel eines Winkelgraphen in der Sagittalebene für das Kniegelenk mit den Winkelwerten aller vier Messzeitpunkte und den Angaben zu den Berechnungen der Peaks für den ersten Bodenkontakt (initial contact), mittlere Stützphase (mid stance) und den Abstoß (toe off).

2.5 Statistik

Die kinematischen Daten der Peak-Werte für die drei Zeitpunkte der Stützphase wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf die Normalverteilung getestet. Auf Grund dieses Testes musste die Annahme der Normalverteilung abgelehnt werden. Zur Berechnung der arithmetischen Mittelwerte und der Standardabweichung der Probandenkollektive wurden die vorge-

gegebenen Funktionen von Matlab verwendet. Um die Peak-Werte der Messzeitpunkte m1- m4 in den drei Stützphasen auf Gleichheit zu prüfen wurde im Anschluss der nicht parametrische Friedmantest zur einfaktoriellen Rangvarianzanalyse mit Messwiederholung angewendet. p -Werte < 0.05 wurden als signifikant bewertet. Anhand des Signrank Post- Hoc Testesverfahrens wurde anschliessend untersucht, wo sich die Unterschiede befinden. Zur Fehlerkontrolle wurde die Bonferroni-Korrektur angewendet. Die Kadenz sowie die Stützzeit wurden für alle vier Messzeitpunkte anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) auf Unterschiedlichkeit geprüft. Auch hier wurden p -Werte < 0.05 als signifikant betrachtet.

3 Resultate

Das durchschnittliche Alter der Läufer betrug 36.8 ± 8.8 Jahre, die durchschnittliche Grösse war 1.81 ± 0.06 Meter und die Läufer liefen im Schnitt 49 ± 30.02 Kilometer in der Woche.

Die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit auf dem Laufband betrug 13.41 ± 1.07 km/h. Vier Läufer gaben am Ende einen Borg-Wert von 13 oder 14 an, die restlichen Läufer erreichten mindestens Borg 15 und mehr am Ende des Laufes. Die durchschnittliche Herzfrequenz lag zu Beginn der Messung bei 90 Schlägen pro Minute und stieg während des Laufes auf durchschnittlich 173 Schlägen pro Minute. Die Ergebnisse der Borg-Werte und die gemessenen Werte der Herzfrequenz lassen darauf schliessen, dass die Belastung während des Laufes zunahm und eine Ermüdung stattgefunden hat.

3.1 Resultate der spatio-temporalen Parameter

Die Stützzeit zeigte während des Belastungslaufes keine signifikante Veränderung ($p = 0.06$) und blieb mit 372 ± 2.6 ms über den gesamten Lauf konstant. Die Kadenz nahm geringfügig jedoch nicht signifikant zwischen Beginn und Ende des Laufes von 170 ± 11 auf ab 167 ± 10 ab ($p = 0.724$).

3.2 Resultate der kinematischen Messungen

Der nicht parametrische Friedmantest zur einfaktoriellen Rangvarianzanalyse mit Messwiederholung sowie die anschliessend durchgeführte Post- Hoc Analyse ergaben für einige Parameter signifikante Unterschiede, sowohl im Vergleich zwischen dem Beginn und dem Ende des Laufes (siehe Abb. 10 - 17), als auch zwischen einzelnen Messzeitpunkten während des Laufes (siehe Abb. 18 - 25).

Im Vergleich zwischen Beginn und Ende des Laufes konnten für die mittlere Stützphase signifikante Veränderung für die Beckenaussenrotation ($p = 0.045$), die Hüftadduktion ($p = 0.039$) sowie die Knieadduktion ($p = 0.004$) gefunden werden. Dabei nahmen die maximale Hüftadduktion um 1.3° , die Beckenaussenrotation um 0.8° und die Knieadduktion um 2° zwischen Beginn und Ende des Laufes zu. Weitere Unterschiede konnten in der Abdruckphase festgestellt werden. Signifikante Veränderungen ergaben sich für die Hüftextension ($p = 0.026$), welche um 2° zunahm, für die Plantarflexion ($p = 0.022$), die Inversion ($p = 0.001$) sowie die Fussadduktion ($p = 0.001$), welche um 2.8 , 2.4 respektive um 2.7° zunahmen. Le-

diglich das Pattern der Knieflexion zeigte eine signifikante Abnahme während der Abdruckphase ($p = 0.024$). Diese nahm um 3.5° zwischen Beginn und Ende des Laufes ab.

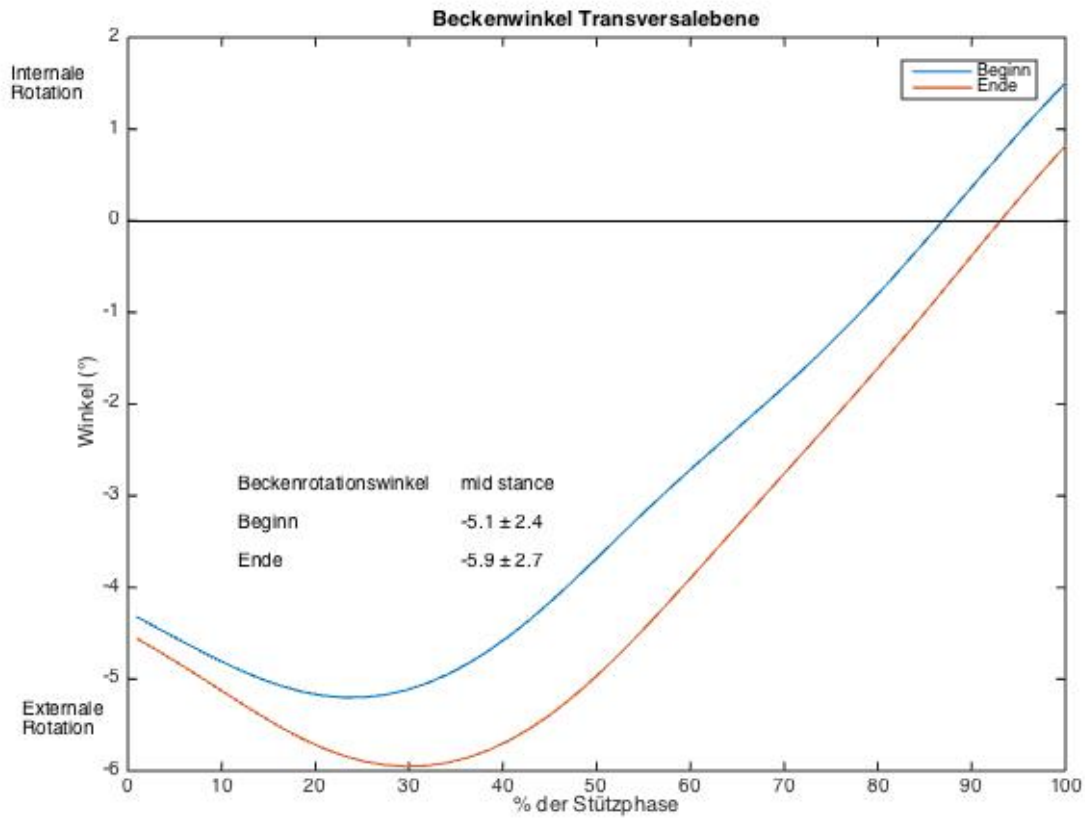


Abbildung 10. Kurven der Gruppenmittelwerte für die Hüftrotation während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der maximalen Hüftaussenrotation für die mittlere Stützphase ($p = 0.045$).

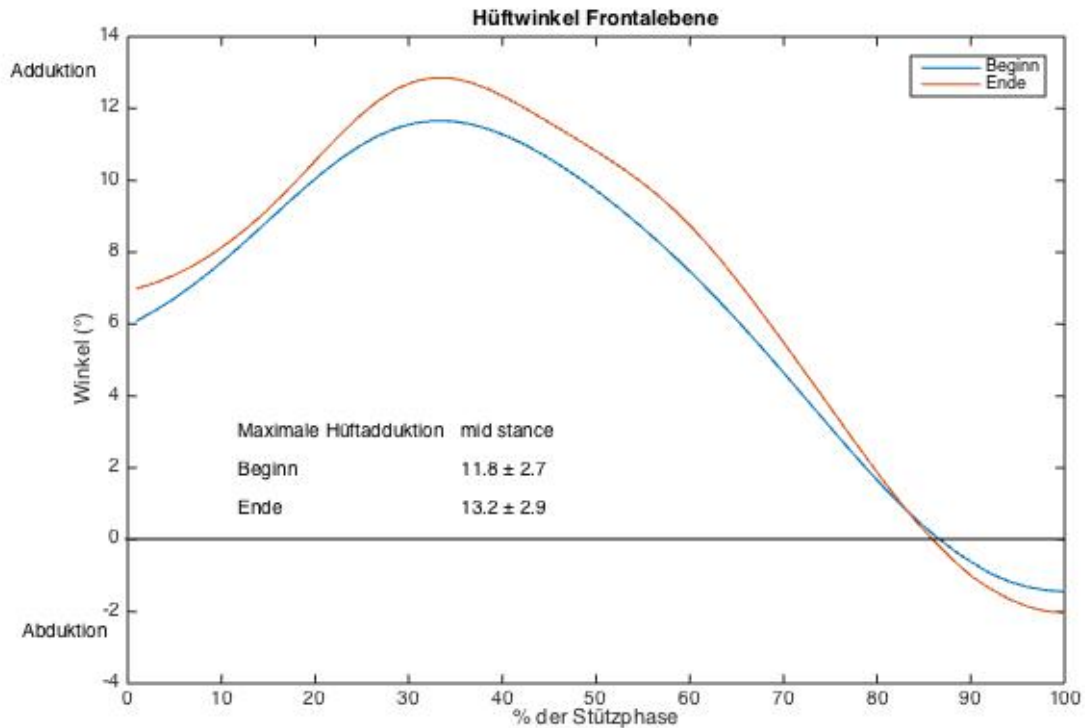


Abbildung 11. Kurven der Gruppenmittelwerte für Hüftadduktion und -abduktion während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der maximalen Hüftadduktion für die mittlere Stützphase ($p = 0.039$).

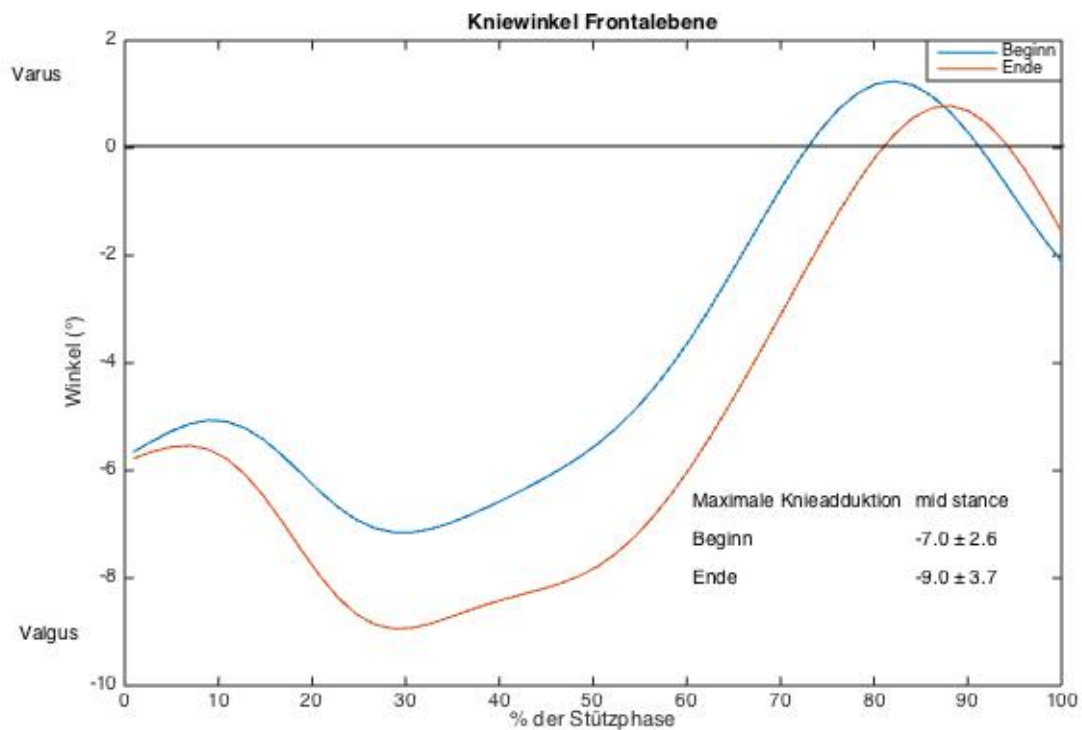


Abbildung 12. Kurven der Gruppenmittelwerte für Knieadduktion (valgus) und Knieabduktion (varus) während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der maximalen Knieadduktion für die mittlere Stützphase ($p = 0.004$).

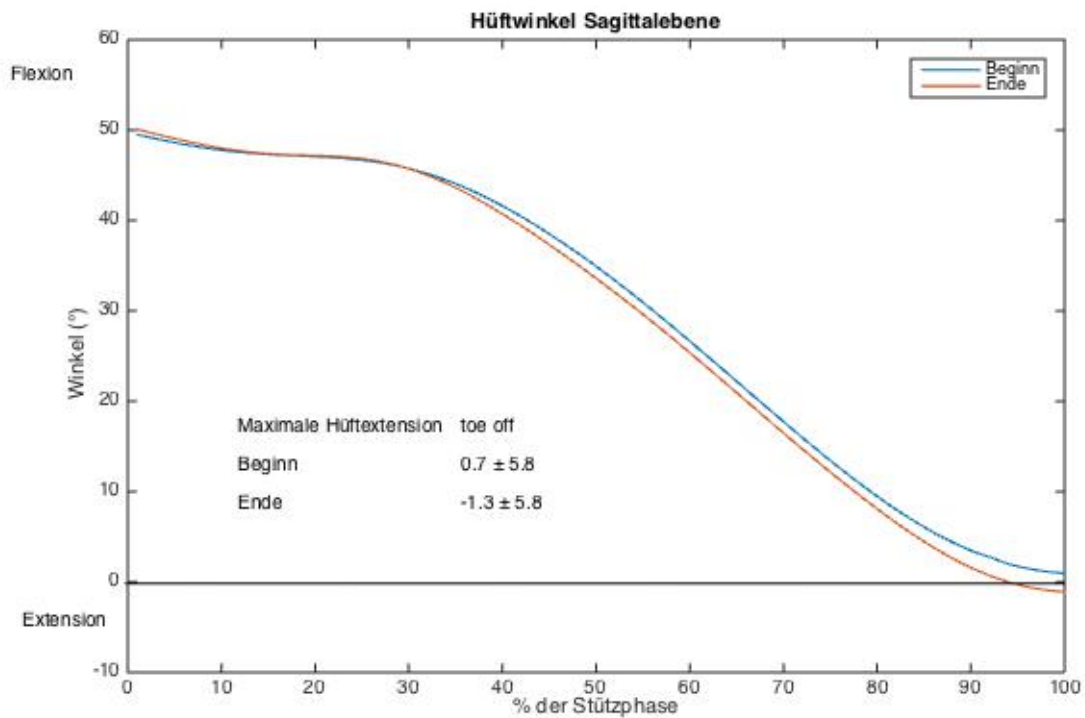


Abbildung 13. Kurven der Gruppenmittelwerte für Hüftflexion und -extension während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der maximalen Hüftextension für die Abdruckphase ($p = 0.026$).

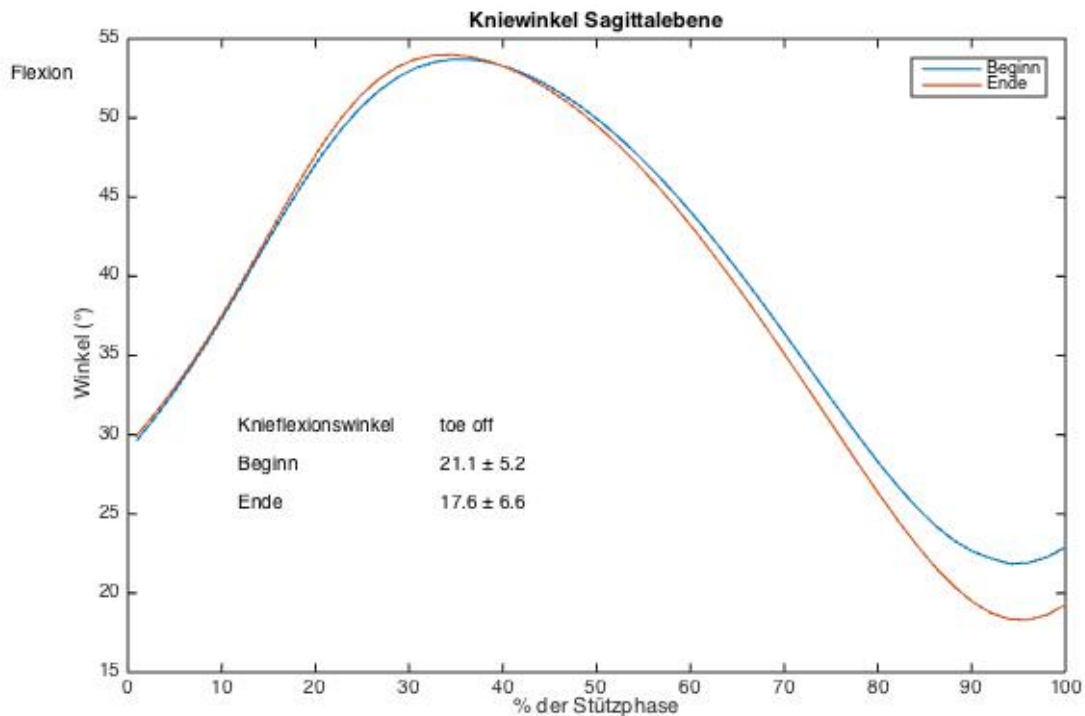


Abbildung 14. Kurven der Gruppenmittelwerte für die Knieflexion während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der Knieflexion für die Abdruckphase ($p = 0.024$).

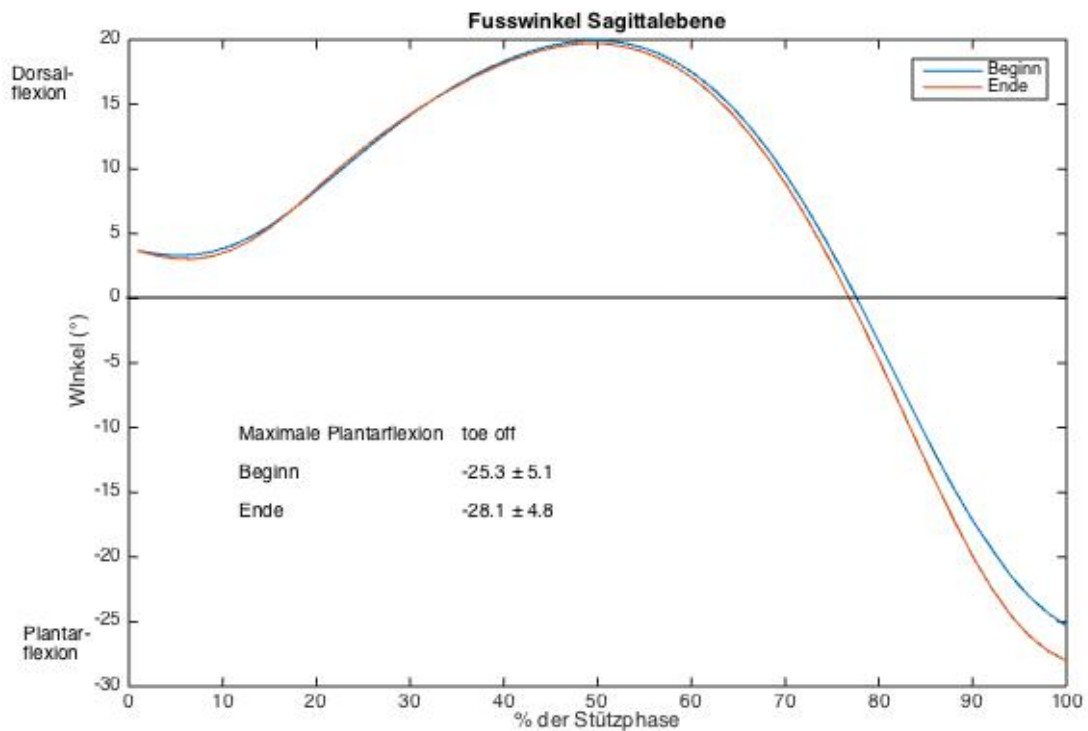


Abbildung 15. Kurven der Gruppenmittelwerte für Dorsal- und Plantarflexion während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der maximalen Plantarflexion für die Abdruckphase ($p = 0.022$).

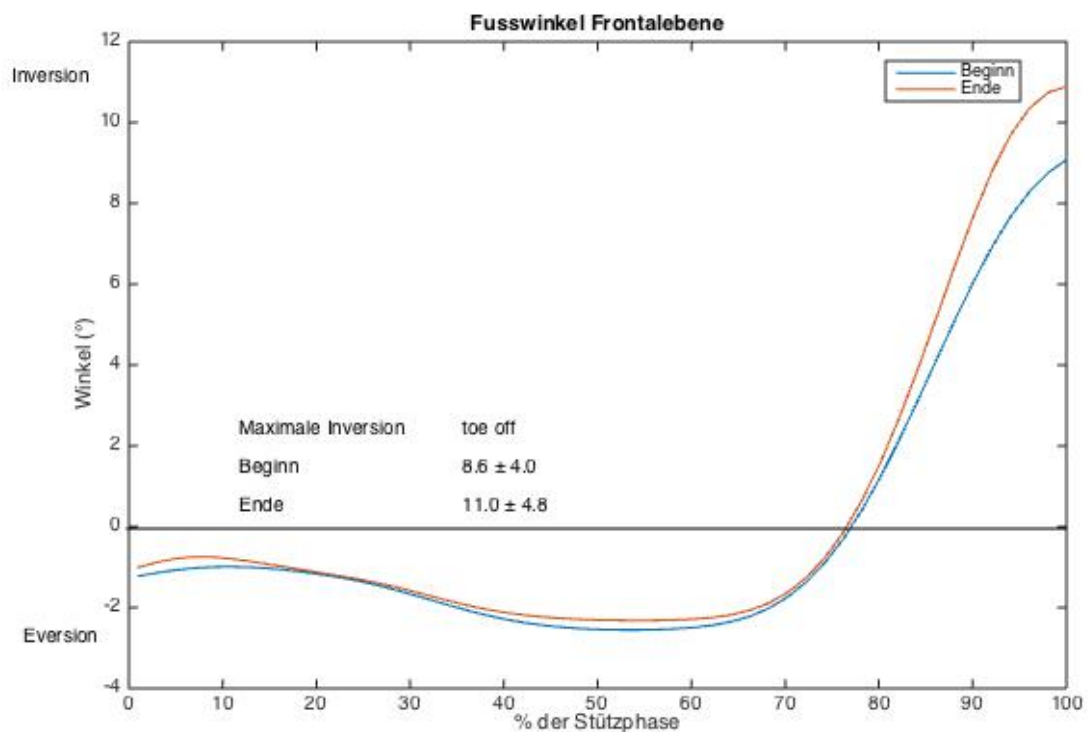


Abbildung 16. Kurven der Gruppenmittelwerte für die Inversion und die Eversion während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der maximalen Inversion für die Abdruckphase ($p = 0.002$).

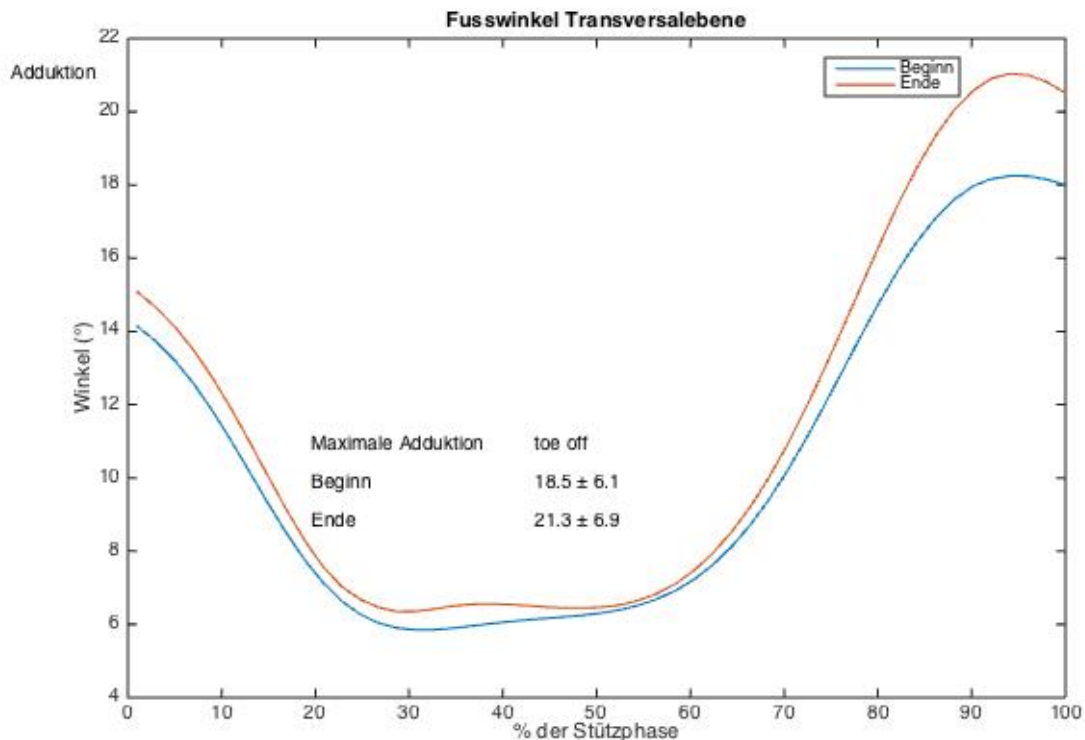


Abbildung 17 Kurven der Gruppenmittelwerte für die Adduktion während der Stützphase zu Beginn (blaue Kurve) des Laufes und am Ende (orange Kurve) des Laufes und durchschnittliche Winkelangaben mit Standardabweichung der maximalen Inversion für die Abdruckphase. ($p=0.001$).

Es konnten jedoch nicht nur signifikante Veränderungen zwischen Beginn und Ende des Laufes gefunden werden, sondern bereits zwischen einzelnen Messzeitpunkten während des Laufes. Die Post-Hoc Analyse zeigte für die mittlere Stützphase bereits signifikante Veränderungen der Hüftadduktion ($p = 0.017$), der Beckenaussenrotation ($p = 0.04$) und der Knieadduktion (Valguswerte) ($p = 0.007$) zwischen m1 und m3. Zusätzlich konnte für die Beckenaussenrotation und die Knieadduktion eine signifikante Veränderung zwischen m1 und m2 festgestellt werden, mit einer Zunahme der Beckenaussenrotation von 19 % und eine um 14 % erhöhte Knieadduktion ($p = 0.02$ respektive $p=0.007$).

Während der Abdruckphase nahm die maximale Hüftextension abgesehen von der Abnahme zwischen m3 und m4 zwischen allen Messzeitpunkten signifikant zu. Dabei nahm die Hüftextension zwischen m1 und m2 um 1.5° ($p = 0.004$) und zwischen m1 und m3 um 2.3° ($p = 0.001$) zu. Der Knieflexionswinkel zeigte zwischen m1 und m2 eine Abnahme von 2.3° ($p = 0.005$) und zwischen m1 und m3 eine um 3.3° ($p = 0.004$) verminderte Knieflexion. Auch die Plantarflexion veränderte sich bereits zwischen m1 und m3 signifikant und nahm um 2.5° ($p = 0.023$) zu. Die Inversion nahm bereits signifikant zwischen m1 und m2 um 1.1° ($p = 0.016$) zu.

zu. Zusätzlich zeigte die Inversion wie auch die Fussadduktion signifikante Veränderungen zwischen m1 und m3 und zwischen m2 und m4. Die Inversion nahm zwischen m1 und m3 um 1.9° ($p = 0.006$) respektive um 1.3° ($p = 0.004$) zwischen m2 und m4 zu. Der Fuss wurde zwischen m1 und m3 um 1.7° ($p = 0.026$) und zwischen m2 und m4 um 1.6° ($p = 0.004$) stärker adduziert.

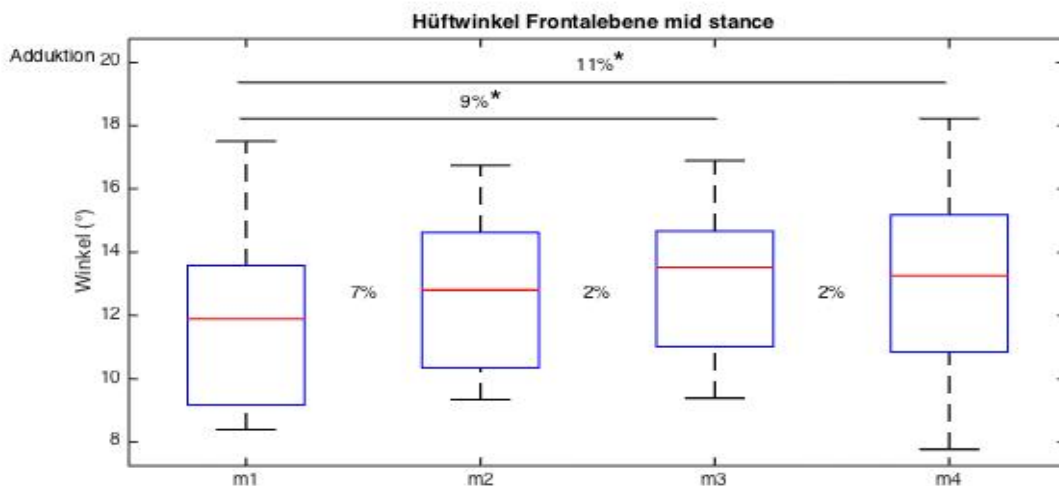


Abbildung 18. Winkelangaben der Hüftadduktion während der mittleren Stützphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50 % der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. $*p < 0.05$.

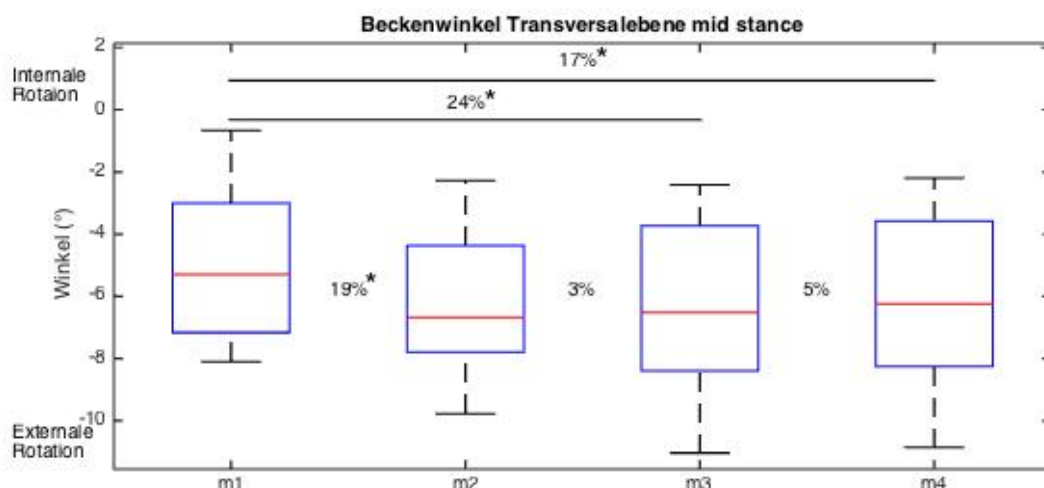


Abbildung 19. Winkelangaben der Beckenrotation während der mittleren Stützphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50 % der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. $*p < 0.05$.

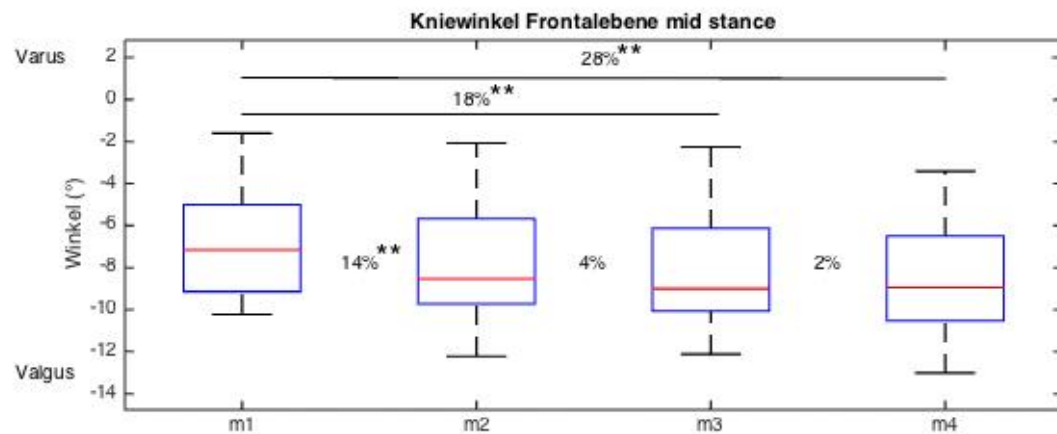


Abbildung 20. Winkelangaben der Knieadduktion (valgus) während der mittleren Stützphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50 % der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. $**p < 0.001$.

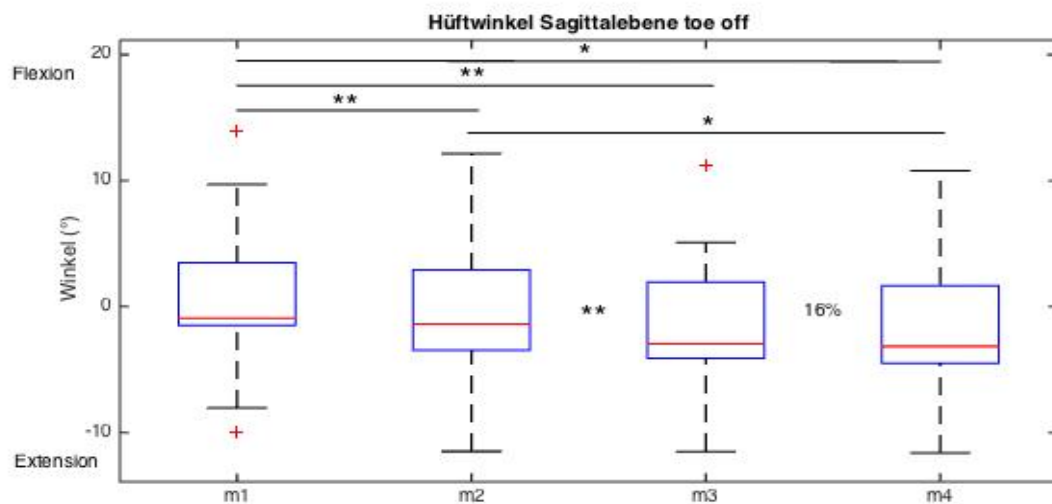


Abbildung 21. Winkelangaben der Hüftextension und Hüftflexion während der Abdruckphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50 % der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Ausreisser sind mit einem + gekennzeichnet. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. Aufgrund der um Null zirkulierenden Zahlen zwischen m1 und m2 sowie zwischen m2 und m3 wurde von einer Berechnung der relativen Differenz zwischen diesen Messzeitpunkten abgesehen. $*p < 0.05$ und $**p < 0.001$.

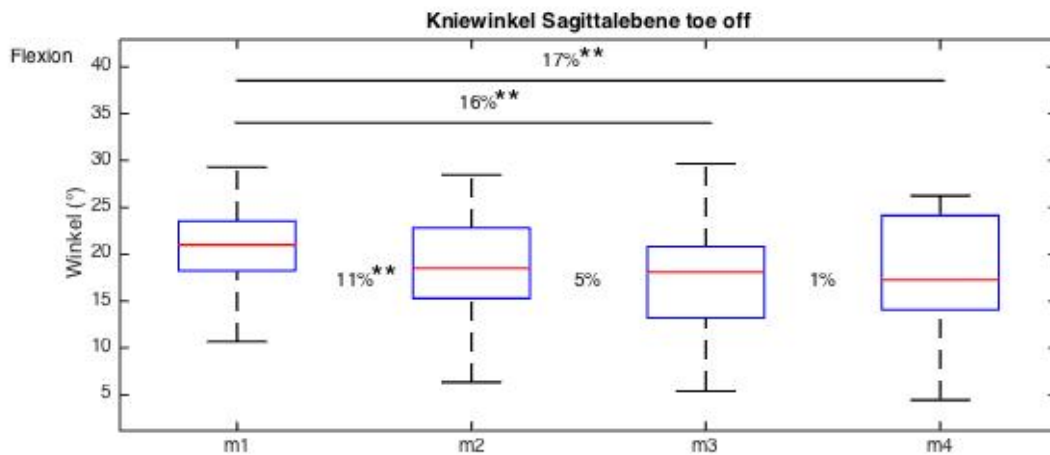


Abbildung 22. Winkelangaben der Knieflexion während der Abdruckphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50% der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. $**p < 0.001$.

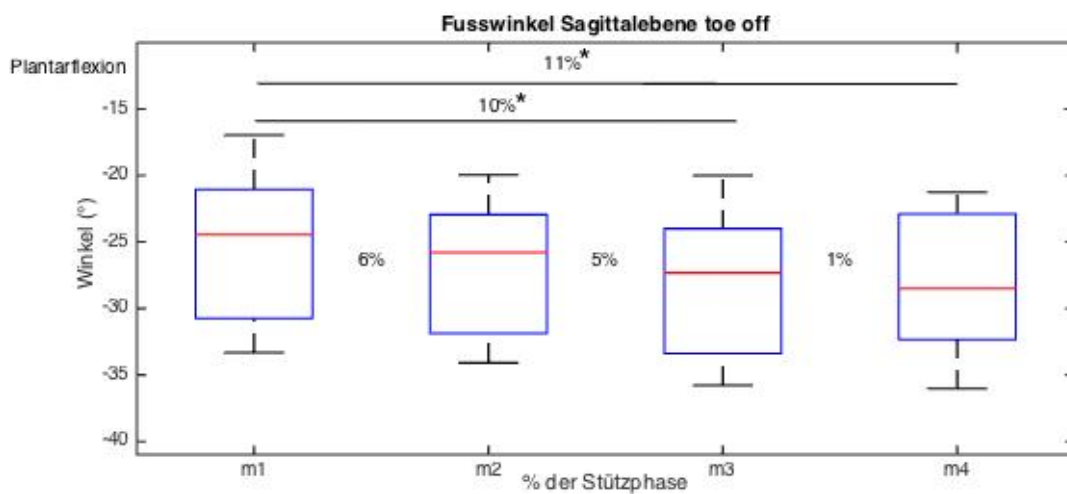


Abbildung 23. Winkelangaben der Plantarflexion während der Abdruckphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50% der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. $*p 0.05$

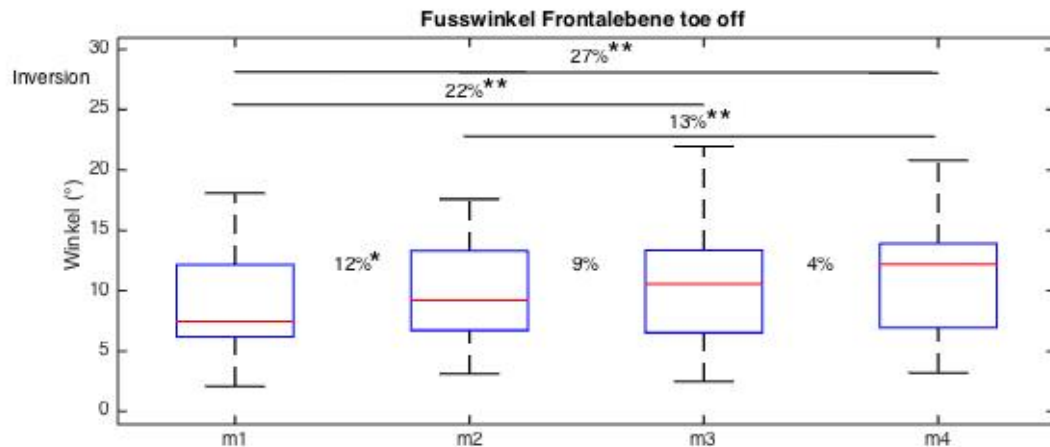


Abbildung 24. Winkelangaben der Inversion während der Abdruckphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50% der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. * $p < 0.05$ und ** $p < 0.001$.

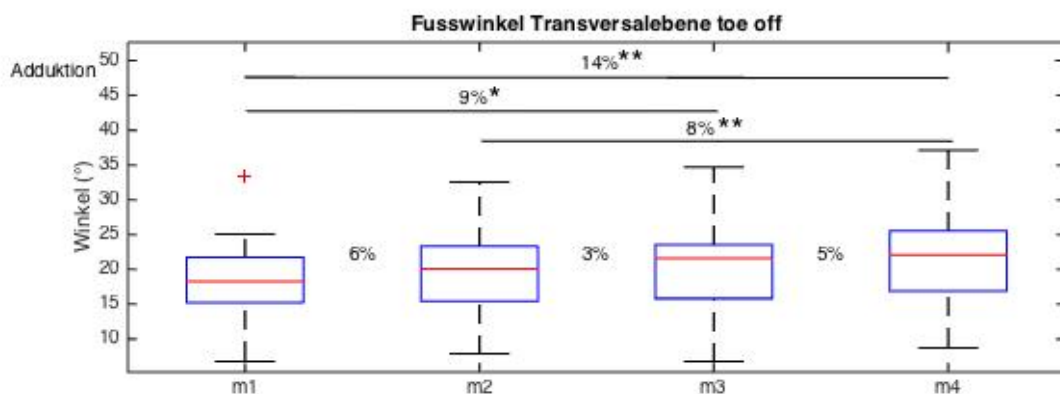


Abbildung 25. Winkelangaben der Adduktion während der Abdruckphase für die vier Messzeitpunkte während des Laufes. Mit 50 % der Gruppenwerte innerhalb der Boxen. Die roten Linien in den Boxen entsprechen dem Median, die Whiskers (senkrechte Linien mit Begrenzungen oberhalb und unterhalb der Boxen) zeigen die Streuung. Ausreisser sind mit einem + gekennzeichnet. Die waagrechten Linien oberhalb der Boxen zeigen signifikante Veränderungen zwischen nicht benachbarten Boxplots. Die Prozentangaben zeigen die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. * $p < 0.05$ und ** $p < 0.001$.

4 Diskussion

Das Ziel dieser Untersuchung war einerseits die Veränderungen von Gelenkwinkeln bei trainierten Läufern unter submaximaler Belastung zwischen unermüdetem und ermüdetem Zustand aufzuzeigen und andererseits zu untersuchen wie sich die kinematischen Parameter während einer Belastung entwickeln. Eine Vielzahl von Studien untersuchte bereits die Veränderungen der Gelenkwinkel zwischen unermüdetem und ermüdetem Zustand, doch kaum eine dokumentierte den Verlauf der Veränderungen unter zunehmender Ermüdung. Durch die repetitiven Kräfte, welche bei jedem Schritt abgebremst werden müssen, hat die Muskulatur der unteren Extremitäten eine wichtige Aufgabe, die sie fordert. Der Phase des initialen Bodenkontaktes kommt daher eine besondere Bedeutung zu, denn während dieser Phase wird die Last amortisiert. Unter Ermüdung zeigen sich jedoch eine erhöhte Muskelsteifigkeit sowie Veränderungen der Voraktivierungs- und Reflexaktivität der Muskulatur, welche zu einer veränderten Bewegungsstruktur führen können. Kinematische Veränderungen während dieser Phase werden auf Grund der wirkenden Abbremskräfte oft mit Überlastungsschäden in Verbindung gebracht (Gerritsen, van den Bogert & Nigg 1995). Diese Studie zeigte für keinen Parameter eine signifikante Veränderung während des initialen Bodenkontaktes, auch für die mittlere Stützphase wurde lediglich bei drei Parametern eine Veränderung ersichtlich. Die meisten Unterschiede zwischen Beginn und Ende des Laufes ergaben sich für die Abdruckphase. Vor dem Hintergrund, dass die Dorsal- und Plantarflexoren während des Laufens eine hohe Aktivität aufweisen, (Reber, Perry & Pink, 1993) wurde vermutet, dass die meisten signifikanten Unterschiede beim Fussgelenk ersichtlich würden. Kein anderes Gelenk als das Fussgelenk zeigte in meiner Untersuchung in allen drei Ebenen signifikante Veränderungen auf. Es kann also angenommen werden, dass der Muskulatur rund um das Fussgelenk eine wichtige Funktion zugeschrieben werden kann, da eine Ermüdung der Dorsal- und Plantarflexoren nicht nur Auswirkungen auf die Bewegungsstruktur des Fussgelenks, sondern auch auf die des Kniegelenks hat (Kellis & Liassou, 2009). Obwohl die meisten Veränderungen für die Winkel des Fussgelenkes gefunden werden konnten, widersprechen meine Resultate den erwarteten Veränderungen mit Ausnahme der stärkeren Plantarflexion, welche mit den Studien von Kellis und Liassou (2009) und Christina et al. (2001) einhergeht. Neben der höheren Plantarflexion wurden eine Zunahme der Eversion und der Abduktion unter Ermüdung erwartet, welche mit einer erhöhten Zugbeanspruchung der Achillessehne und somit einem erhöhten Verletzungsrisiko

einhergehen (Mayer et al., 2000). In meiner Untersuchung zeigte sich jedoch eine stärkere Inversion zusammen mit einer erhöhten Adduktion des Fusses während der Abdruckphase. Obwohl diese Resultate nicht vergleichbar sind mit den ermüdungsbedingten Veränderungen, welche bei Derrick, Dereu und Mc Lean (2001), Dierks, Davis und Hamill (2010) und Kellis und Liassou (2009) gefunden wurden, kann auch dieses Bewegungsverhalten in den Kontext von Überlastungsschäden gesetzt werden, da auch dieses Bewegungsverhalten zu erhöhter Zugspannung auf die Achillessehne führen kann. Auch eine erhöhte Hüftadduktion in Kombination mit einer verstärkten Tibiainnenrotation wird häufig in Zusammenhang mit Überlastungsschäden diskutiert. Dieses Bewegungsverhalten kann zu einer erhöhten Zugspannung im Kniegelenk führen. Dies wird vielfach in Zusammenhang mit dem Patellofemorale Schmerzsyndrom gebracht (Barton et al., 2012; Ferber & McDonald, 2014). Dierks, Davis und Hamill, (2010) zeigten, dass sich durch Ermüdung die Tibiainnenrotation sowie die Hüftadduktion, wenn auch nicht signifikant, verstärken können. Obwohl auch in der vorliegenden Studie eine erhöhte Hüftadduktion während der mittleren Stützphase festgestellt wurde, ergaben sich für die Tibiainnenrotation zwischen Beginn und Ende des Laufes keine Unterschiede. Stattdessen zeigte sich am Ende des Laufes eine stärkere Knieadduktion in Kombination mit der Hüftadduktion. Es kann vermutet werden, dass das Kniegelenk stärker adduziert wurde, um diese Zugspannung im Kniegelenk zu reduzieren. Somit kann diese Veränderung als kompensatorische Bewegung gesehen werden, um die Belastung auf das Kniegelenk zu vermindern.

Hinsichtlich der Veränderungen der Flexionsbewegungen wurde angenommen, dass diese nach längerer Belastung geringer ausfallen würden auf Grund der stärkeren Beanspruchung der Streckmuskulatur während des Laufens (Hottenrott, Hoos & Sommer, 2001). Während bei einigen Studien die Knieflexion während des initialen Bodenkontaktes in der mittleren Stützphase oder der Abdruckphase zunahm (Derrick, Dereu & Mc Lean, 2001; Kellis & Liassou, 2009), zeigte sich in der vorliegenden Studie während des initialen Bodenkontaktes und der mittleren Stützphase gar keine Veränderung des Knie- und Hüftgelenkwinkels in der Sagittalebene. In der Abdruckphase konnten hingegen sogar eine verminderte Flexion im Kniegelenk und eine verstärkte Hüftextension festgestellt werden. Zudem wurde auch das Becken stärker nach aussen rotiert. Die stärkeren Extensionsbewegungen und die Aussenrotation des Beckens könnten als kompensatorisches Bewegungsverhalten durch die leicht abnehmende Kadenz erklärt werden. Die Hüfte und das Kniegelenk wurden stärker extendiert und das Becken wurde nach aussen rotiert, um die Leistung, bei gleichbleibender

Geschwindigkeit, aufrecht zu erhalten. Die beschriebenen Veränderungen der vorliegenden Studie gehen kaum mit den ermüdungsbedingten Veränderungen bisheriger Studien einher. Dies lässt vermuten, dass die ersichtlichen Resultate nicht auf Ermüdung zurückzuführen sind, sondern vielmehr dazu dienen, ökonomisch und effizient zu laufen. Diese Annahme unterstützt auch die Entwicklung der Veränderungen über die vier Messzeitpunkte. Es wurde angenommen, dass sich auf Grund zunehmender Ermüdung vor allem gegen Ende des Belastungslaufes Unterschiede im Vergleich zum Beginn des Laufes ergeben würden. In den untersuchten Parametern zeigte sich jedoch, dass vor allem zwischen m1 und m2 die grössten Unterschiede verzeichnet wurden. Diese Veränderungen gehen mit dem stärkeren Anstieg der Herzfrequenz während diesen Messzeitpunkten einher. Es kann angenommen werden, dass neben der höheren Belastung nach der Erholungspause auch der bewegungsunabhängige Faktor «Laufband» dazu führte, dass sich die Läufer in den ersten Minuten an die gegebene Belastung auf dem Laufband gewöhnen mussten und sich nach dem zweiten Messzeitpunkt einen ökonomischeren und effizienteren Bewegungsablauf einstellte, was dazu führte, dass sich die Herzfrequenz, wie auch die kinematischen Parameter im weiteren Verlaufe weniger stark veränderten. Ich halte es dennoch für wahrscheinlich, dass sich die Ergebnisse in eine ähnliche Richtung wie in den beschriebenen Studien verhalten hätten, wenn die Läufer länger als die 42 Minuten gelaufen wären. Die gegenläufigen Messresultate der Beckenaussenrotation und der Hüftextension und der nur noch geringfügigen Veränderungen des Knie- und Fussgelenkwinkels in der Sagittalebene zwischen m3 und m4 pflichten dieser Vermutung bei. Während die Beckenaussenrotation und die Hüftextension zwischen m1 und m3 zunahm zeichnete sich, auch wenn nicht signifikant, zwischen m3 und m4 eine leichte Abnahme bei beiden Parametern ab. Auch die relativen Unterschiede der restlichen Parameter zeigen, dass zwischen m1 und m2 die grössten Veränderungen entstanden und gegen Ende des Laufes nur noch geringfügige nicht signifikante Veränderungen stattfanden. Hinsichtlich ermüdungsbedingter Veränderungen war die Intensität für die Läufer beziehungsweise die Dauer des Laufes zu kurz, um effektive Veränderungen durch Ermüdung zu sehen. Nicol, Komi & Marconnet (1991) zeigten in ihrer Studie die Effekte von Ermüdung eines Marathonlaufes auf die Muskelkraft. Es versteht sich von selbst, dass die Belastung eines Marathonlaufes nicht mit der Belastung der vorliegenden Studie vergleichbar ist und somit nicht ein gleiches Mass an Ermüdung zu erwarten ist. Es ist gut vorstellbar, dass durch die Kenntnis der Probanden, wann die Aufnahmen getätigt wurden, die Konzentration kurzfristig gesteigert wurde und somit durch das Bewusstsein die Bewegungskoordination kurzfristig verbessert wurde. Die Inkonsistenz der Resultate der beschriebenen Studien im Vergleich zu

meiner Untersuchung könnte des weiteren auch durch die unterschiedlichen Belastungsprotokolle und der Art und Weise, wie die Ermüdung induziert wurde, erklärt werden. Neben den unterschiedlichen Protokollen wichen auch die verschiedenen Studienpopulationen voneinander ab. Lediglich Abt et al. (2011) untersuchten ebenfalls bereits erfahrene Läufer und auch sie fanden keine vergleichbaren Resultate mit den bestehenden Untersuchungen. Dies lässt vermuten, dass der Trainingszustand der Läufer, was ermüdungsbedingte kinematische Veränderungen angeht, einen wesentlichen Einfluss hat. Es kann angenommen werden, dass bei erfahrenen Läufern bei vergleichbarer Intensität und Dauer ermüdungsbedingte Veränderungen geringer ausfallen als bei Freizeitläufer. Wie eingangs beschrieben führen adäquate Belastungen zu einer Stärkung des Bewegungs- und Stützsystems. Wird der Körper regelmässig an adäquaten Belastungen in Kombination mit genügend Erholung ausgesetzt, vermindert sich das Verletzungsrisiko (Hreljac, 2005). Es kann angenommen werden, dass die vorliegende Belastungsdauer und Intensität für erfahrene Läufer unterhalb der «Injury Region» zu liegen kam. Es verwundert daher nicht, dass vor allem Langstreckenläufer an Überlastungsschäden leiden (Johnson, 1985). Inwiefern jedoch bereits auch diese nicht ermüdungsbedingten Veränderungen zur Entstehung von Überlastungsschäden beitragen, kann nicht gesagt werden.

Die Limitationen der Studie liegen unter anderem in der Laufdauer und der Intensität, des Belastungslaufes. Wie oben erwähnt wird vermutet, dass bei einem längeren Lauf mit stärkeren kinematischen Veränderungen gerechnet werden könnte. Da jedoch die Marker lediglich mit Klebeband an den Probanden angebracht wurden, wäre eine längere Dauer mit mehreren Messzeitpunkten rein messmethodisch nur bedingt möglich gewesen. Bereits diese Dauer erwies sich als herausfordernd, was die Befestigung der Marker anbetrifft. Durch die wiederholenden Abbremsstösse, den Schweiss und die Tatsache, dass die Lage einiger Marker an einem stark bewegten Punkt war, ist anzunehmen, dass geringe Veränderungen der Lage der Marker gegen Ende des Laufes auftraten und somit die ausgewerteten Winkel weniger vergleichbar sind. Messungen an verschiedenen Messzeitpunkten wird jedoch empfohlen, um allfällige ökonomisch bedingte Veränderungen festzuhalten. Zudem zeigte sich, dass die Intensität zu gering war, um die Resultate mit den bestehenden Studien von gleicher Dauer zu vergleichen. Allgemein zeigen die beschriebenen Studien zum Teil widersprüchliche Resultate auf Grund der verschiedenen Belastungs- und Ermüdungsprotokolle. Um verallgemeinernde Resultate zu erhalten, sollten diese Protokolle stets in gleicher Weise angewendet werden. Zudem trugen die Läufer in meiner Untersuchung ihre eigenen

Laufschuhe. Bei Dierks, Davis und Hamill (2010) und Derrick, Dereu und Mc Lean (2001) wurden die Läufer mit einem Einheitsmodell ausgestattet. Es kann vermutet werden, dass der Bewegungsablauf zusätzlich durch ungewohntes Schuhwerk beeinflusst wurde und sich somit weitere Unterschiede zwischen meiner Untersuchung und ihren den Befunden ergaben. Obwohl auch in den beschriebenen Studien jeweils ein Laufband für den Belastungslauf benutzt wurde, wird die Bewegungsstruktur auch durch das Laufen auf dem Laufband beeinflusst. Einerseits widerspiegelt das Laufen auf dem Laufband durch die konstant gehaltene Laufgeschwindigkeit keine natürliche Laufsituation und andererseits unterscheidet sich der Laufuntergrund zwischen Laufband und der natürlichen Oberfläche erheblich. Zudem wurde die Ermüdung lediglich anhand der Borg-Skala und der Herzfrequenz ermittelt. Anhand der Ergebnisse wurde zwar vermutet, dass die Veränderungen nicht auf Ermüdung zurückzuführen sind, jedoch wäre es von Nutzen gewesen, die Muskelaktivität zusätzlich zu messen. Ebenfalls wäre das Messen der Bodenreaktionskräfte dienlich gewesen, um bessere Rückschlüsse über die Belastung während des Laufes zu haben.

Obwohl verschiedene Studien ermüdungsbedingte Veränderungen finden konnten und auch in der vorliegenden Studie zumindest kinematische Veränderungen während der Laufbelastung ersichtlich wurden, bleibt immer noch offen, wie stark das Bewegungs- und Stützsystem durch diese Veränderungen beansprucht wird. Allgemein können die Veränderungen nur schwierig bewertet werden, da kaum Daten bekannt sind, welche Winkelabweichungen tatsächlich pathologisch sind. Die beschriebenen Studien zeigten zudem lediglich die Auswirkung von Ermüdung einer einzigen Laufbelastung. Viele Läufer, vor allem im Langstreckenlauf, haben enorme Trainingsumfänge und trainieren mehrmals wöchentlich. Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, dass vor allem diese Läuferpopulation oftmals von Überlastungsschäden betroffen ist, sollten weiterführende Studien kinematische Veränderungen nach mehreren Belastungen untersuchen und anstelle einer Querschnittstudie eine prospektive Untersuchung durchführen. Die Studien, welche kinematische Veränderungen in Zusammenhang mit Überlastungsschäden untersuchten, haben meist eine gesunde Population mit einer symptomatischen Population verglichen. Ungeachtet der einzelnen kinematischen Veränderungen, welche als Risiko für Überlastungsschäden diskutiert werden, bleibt unklar ob diese Veränderungen auf Grund der Verletzung oder als Ursache dieser Verletzung bestehen.

5 Schlussfolgerung

Die gefundenen Resultate dieser Studie zeigten bei der vorliegenden Belastung keine ermüdungsbedingten Veränderungen der Laufbewegung auf. Es kann daraus geschlossen werden, dass Athleten mit ähnlichem Trainingszustand bei gegebener Dauer und Intensität geringeren Belastungen ausgesetzt sind, als weniger trainierte Läufer. Um weitere Kenntnisse bezüglich des Zusammenhangs zwischen ermüdungsbedingten kinematischen Veränderungen und Überlastungsschäden zu erlangen, sollten prospektive Studien durchgeführt werden. Dabei sollten neben dem Einfluss einer längeren Belastungsdauer auch der Einfluss, mehrerer aufeinander folgenden Trainingseinheiten untersucht werden.

Literatur

- Abt, J. P., Sell, T. C., Chu, Y., Lovalekar, M., Burdett, R. G., & Lephart, S. M. (2011). Running kinematics and shock absorption do not change after brief exhaustive running. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(6), 1479-1485. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181ddfcf8
- Appell, H. J., & Stang-Voss, C. (2008). *Funktionelle Anatomie: Grundlagen sportlicher Leistung und Bewegung* (4. Aufl.). Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Barton, C. J., Levinger, P., Crossley, K. M., Webster, K. E., & Menz, H. B. (2012). The relationship between rearfoot, tibial and hip kinematics in individuals with patellofemoral pain syndrome. *Clinical biomechanics*, 27(7), 702-705. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2012.02.007
- Bauersfeld, K. H. & Schröter, G. (1992). *Grundlagen der Leichtathletik*. Berlin: Sportverlag.
- Bigland-Ritchie, B. W. J. J., & Woods, J. J. (1984). Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle & nerve*, 7(9), 691-699.
- Boyas, S., & Guével, A. (2011). Neuromuscular fatigue in healthy muscle: underlying factors and adaptation mechanisms. *Annals of physical and rehabilitation medicine*, 54(2), 88-108. doi:10.1016/j.rehab.2011.01.001
- Brown, A. M., Zifchock, R. A., & Hillstrom, H. J. (2014). The effects of limb dominance and fatigue on running biomechanics. *Gait & posture*, 39(3), 915-919.
- Cannon, W. B. (1932). *The wisdom of the Body*. New York: W. W. Norton & Company.
- Cavanagh, P. R., & Komi, P. V. (1979). Electromechanical delay in human skeletal muscle under concentric and eccentric contractions. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 42(3), 159-163.
- Christina, K. A., White, S. C., & Gilchrist, L. A. (2001). Effect of localized muscle fatigue on vertical ground reaction forces and ankle joint motion during running. *Human movement science*, 20(3), 257-276.
- Derrick, T. R., Dereu, D. A. R. R. I. N., & Mclean, S. P. (2002). Impacts and kinematic adjustments during an exhaustive run. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(6), 998-1002.
- Dicharry, J. (2010). Kinematics and kinetics of gait: from lab to clinic. *Clinics in sports medicine*, 29(3), 347-364. doi:10.1016/j.csm.2010.03.013
- Dierks, T. A., Davis, I. S., & Hamill, J. (2010). The effects of running in an exerted state on

- lower extremity kinematics and joint timing. *Journal of biomechanics*, 43(15), 2993-2998. doi:10.1016/j.jbiomech.2010.07.001
- Edwards, R. H. (1981). Human muscle function and fatigue. In: R. Porter & J. Whelan (Hrsg), *Human muscle fatigue: physiological mechanisms* (S. 1-18). London: Pitman Medical.
- Enoka, R. M. (1995). Mechanisms of muscle fatigue: central factors and task dependency. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 5(3), 141-149. doi: 10.1016/1050-6411(95)00010-W
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of physiology*, 586(1), 11-23. doi: 10.1113/jphysiol.2007.139477
- Ferber, R., & Macdonald, S. (2014). *Running mechanics and gait analysis*. Stanningsley: Human Kinetics.
- Fredericson, M., & Misra, A. K. (2007). Epidemiology and aetiology of marathon running injuries. *Sports Medicine*, 37(4-5), 437-439.
- Gage, J. R. (1990). An overview of normal walking. *AAOS Instructional course lectures*, 39, S. 291–303.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological reviews*, 81(4), 1725-1789.
- García-Pérez, J. A., Pérez-Soriano, P., Llana, S., Martínez-Nova, A., & Sánchez-Zuriaga, D. (2013). Effect of overground vs treadmill running on plantar pressure: Influence of fatigue. *Gait & posture*, 38(4), 929-933.
- Gerritsen, K. G., van den Bogert, A. J., & Nigg, B. M. (1995). Direct dynamics simulation of the impact phase in heel-toe running. *Journal of biomechanics*, 28(6), 661-668.
- Harre, D., Krug, J., & Schnabel, G. (2008). *Trainingslehre-Trainingswissenschaft: Leistung-Training-Wettkampf*. Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Hoeberigs, J. H. (1992). Factors related to the incidence of running injuries. *Sports Medicine*, 13(6), 408-422.
- Hohmann, E., Wörtler, K., & Imhoff, A. B. (2004). MR imaging of the hip and knee before and after marathon running. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(1), 55-59.
- Hottenrott, K., Hoos, O., & Sommer, H. M. (2001). Structure of locomotion and neuromuscular activity of lower extremity muscles during non-fatigued and fatigued running. In: H. Gerber & R. Müller (Hrsg.), *Proceedings of the XVIII th Congress of Biomechanics (ISB)*. Zürich: ETH Zürich.
- Hottenrott, K., & Hoos, O. (2003). Belastung und Beanspruchung beim Lauf in frischem und

- ermüdetem Zustand. In: G. P. Brüggemann & G. Morey Klapsing (Hrsg.). *Biologische Systeme- Mechanische Eigenschaften und ihre Adaptation bei körperlicher Belastung. 7.Symposium der dvs-Sektion Biomechanik vom 13.-15.März 2003 in Köln* (S. 59-64). Hamburg: Czwalina Verlag.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2010). Ist das Superkompensationsmodell noch aktuell. *Leistungssport*, 35 (2), 13-19.
- Hömke, J. (2009). *Bewegungsanalytische Untersuchung zur Veränderung des Laufbildes bei muskulärer Ermüdung*. (1. Aufl.). Norderstedt: Grin Verlag.
- Hreljac, A., Marshall, R. N., & Hume, P. A. (2000). Evaluation of lower extremity overuse injury potential in runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(9), 1635-1641.
- Hreljac, A. (2005). Etiology, prevention, and early intervention of overuse injuries in runners: a biomechanical perspective. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, 16(3), 651-667.
- Kellis, E., & Liassou, C. (2009). The effect of selective muscle fatigue on sagittal lower limb kinematics and muscle activity during level running. *journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 39(3), 210-220.
- Klinke, R., Pape, H. C., Kurtz, A., & Silbernagl, S. (2009). *Physiologie* (6. Aufl.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Komi, P. V., Hyvärinen, T., Gollhofer, A., & Mero, A. (1986). Man-shoe-surface interaction: special problems during marathon running. *Acta Univ Oul A*, 179(69), 69-72.
- Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of biomechanics*, 33(10), 1197-1206.
- Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., Daoud, A. I., D'Andrea, S., Davis, I. S., ...Pitsiladis, Y. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 463(7280), 531-535. doi:10.1038/nature08723
- List, R. (2005). *A hybrid marker set: for future basic research and instrumented gait analysis at the Laboratory for biomechanics* (Unveröffentlichte Dissertation). ETH Zürich.
- Macera, C. A. (1992). Lower extremity injuries in runners. *Sports medicine*, 13(1), 50-57.
- Mariani, D. (2014). *Immer mehr Schweizer im Lauffieber*. Swissinfo. URL: https://www.swissinfo.ch/ger/gesellschaft/boom-bei-volkslaeufen-_immer-mehr-schweizer-im-lauffieber/38738940 (abgerufen am 22. Juli 2017).
- Marquardt, M. (2012). *Laufen und Laufanalyse. Medizinische Betreuung von Läufern*. Stuttgart: Thieme Verlag.

- Mattes, K., Hazzaa Walaa Eldin, A., & Manzer, S. (2014). Reproduzierbarkeit lokaler Muskelermüdung der Dorsal-und Plantarflexoren des Sprunggelenks. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 65(9).
- Mayer, F., Grau, S. B., Bäurle, W., Beck, M., Krauss, I., Maiwald, C., & Baur, H. (2000). Achillessehnenbeschwerden im Laufsport—eine aktuelle Übersicht. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 51(5), 161-167.
- Meeuwisse, W. H. (1994). Assessing causation in sport injury: A multifactorial model. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 4, 166-170.
- Michel, S. (2001). *Muskuläre Ermüdung: theoretische Grundlagen und experimentelle Befunde*. Marburg: Tectum Verlag.
- Mizrahi, J., Verbitsky, O., & Isakov, E. (2000). Fatigue-related loading imbalance on the shank in running: a possible factor in stress fractures. *Annals of biomedical engineering*, 28(4), 463-469.
- Mizrahi, J., Verbitsky, O., & Isakov, E. (2001). Fatigue-induced changes in decline running. *Clinical Biomechanics*, 16(3), 207-212.
- Neumann, G., & Hottenrott, K. (2016). *Das große buch vom laufen*. Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Nicol, C., Avela, J., & Komi, P. V. (2006). The stretch-shortening cycle. *Sports Medicine*, 36(11), 977-999.
- Nicol, C., Komi, P. V., & Marconnet, P. (1991). Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 1(1), 10-17. doi: 10.1111/j.1600-0838.1991.tb00266.x
- Nicola, T. L., & Jewison, D. J. (2012). The anatomy and biomechanics of running. *Clinics in sports medicine*, 31(2), 187-201. doi:10.1016/j.csm.2011.10.001
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait & posture*, 7(1), 77-95.
- Ounpuu, S. (1989). The biomechanics of running: a kinematic and kinetic analysis. *Instructional course lectures*, 39, 305-318.
- Platonov, V. N. (1999). *Belastung-Ermüdung-Leistung: der moderne Trainingsaufbau*. Münster: Philippka.
- Powell, K. E., Thompson, P. D., Caspersen, C. J., & Kendrick, J. S. (1987). Physical activity and the incidence of coronary heart disease. *Annual review of public health*, 8(1), 253-287.
- Radin, E. L. (1986). Role of muscles in protecting athletes from injury. *Journal of Internal Medicine*, 220(S711), 143-147. doi: 0.1111/j.0954-6820.1986.tb08943.x

- Reber, L., Perry, J., & Pink, M. (1993). Muscular control of the ankle in running. *The American journal of sports medicine*, 21(6), 805-810.
- Renström, P., & Johnson, R. J. (1985). Overuse injuries in sports. *Sports Medicine*, 2(5), 316-333.
- Rodgers, M. M. (1988). Dynamic biomechanics of the normal foot and ankle during walking and running. *Physical therapy*, 68(12), 1822-1830.
- Schmidt, R. F., Lang, F., & Heckmann, M. (2011). *Physiologie des Menschen: mit pathophysiologie*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Simon, C. (1998). *Zur Effizienz und Ökonomie des Mittel-/Langstreckenlaufs*. Köln: Sport und Buch Strauss.
- Suppé, B. (2014). Grundlagen über Bau und Funktion des Körpers. In I. Spirig-Gantert & B. Suppé (Hrsg.). *FBL Klein-Vogelbach Functional Kinetics Die Grundlagen* (S. 11-34). doi: 10.1007/978-3-642-41901-0
- Taimela, S., Kujala, U. M., & Osterman, K. (1990). Intrinsic risk factors and athletic injuries. *Sports Medicine*, 9(4), 205-215.
- Tanner, R. K., & Gore, C. J. (2013). *Australian Institute of Sport. Physiological tests for elite athletes* (2. Aufl.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Taunton, J. E., Ryan, M. B., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Lloyd-Smith, D. R., & Zumbo, B. D. (2002). A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries. *British journal of sports medicine*, 36(2), 95-101.
- Voloshin, A. S., Mizrahi, J., Verbitsky, O., & Isakov, E. (1998). Dynamic loading on the human musculoskeletal system—effect of fatigue. *Clinical Biomechanics*, 13(7), 515-520.
- Van Gent, B. R., Siem, D. D., van Middelkoop, M., van Os, T. A., Bierma-Zeinstra, S. S., & Koes, B. B. (2007). Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review. *British journal of sports medicine*, 41, 469-480. doi: 10.1136/bjism.2006.033548
- Van Mechelen, W. (1992). Running injuries. *Sports Medicine*, 14(5), 320-335.
- Vaughan, C. L. (1984). Biomechanics of running gait. *Critical reviews in biomedical engineering*, 12(1), 1-48.
- Walther, M., Reuter, I., Leonhard, T., & Engelhardt, M. (2005). Verletzungen und überlastungsreaktionen im laufsport. *Der Orthopäde*, 34(5), 399-404.

- Wen, D. Y., Puffer, J. C., & Schmalzried, T. P. (1997). Lower extremity alignment and risk of overuse injuries in runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(10), 1291-1298.
- Wolff, J. (1893). Das gesetz der transformation der knochen. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 19(47), 1222-1224.

Anhang



Probandeninformation

Der Einfluss zunehmender Ermüdung beim Laufen auf die Entwicklung der Kinematik und Kinetik der unteren Extremitäten bei trainierten Läufern

Masterarbeit von Tabitha Ingold in Zusammenarbeit mit der Rennbahnklinik AG

Sehr geehrter Proband

Vielen Dank dass Sie sich bereit erklären an unserem Projekt teilzunehmen. Hier erhalten Sie einige detaillierte Informationen zum Ablauf der Untersuchung.

1. Auswahl der ProbandInnen

Sie wurden für die Studie angefragt, weil Sie zwischen 18 und 52 Jahren alt sind und mindestens 15km pro Woche laufen. Sie benutzen keine orthopädischen Einlagen und weisen keine kardiovaskuläre Pathologie (Erkrankungen vom Gefässsystem oder/und vom Herzen wie z.B. koronare Herzkrankheit, Herzinfarkt oder periphere arterielle Verschlusskrankheit) auf. Zudem haben Sie in den sechs letzten Monaten an keinen Verletzungen der unteren Extremitäten und der Hüfte gelitten, welche das Gangbild beeinflussen könnten.

2. Ziel der Studie

Das Forschungsprojekt untersucht die Veränderung von Gelenkwinkeln, Gangmuster und Bodenreaktionskräfte mit zunehmender Ermüdung während eines submaximalen Laufes von 42 Minuten. Die Kenntnis über kinematische und kinetische Veränderungen durch Ermüdung während des Laufens ist insofern wichtig, um Veränderungen zu bewerten, welche Leistung und Verletzungen beeinflussen könnten.

3. Allgemeine Informationen zur Studie

Diese Studie wird im Rahmen einer Qualifikationsarbeit zur Erlangung des Masterabschlusses im Studiengang „Gesundheit und Forschung“ der Universität Fribourg, am Medizindepartement innerhalb der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät durchgeführt.

Sie findet ausschliesslich in den Räumlichkeiten der Praxisklinik Rennbahn AG statt.

Die Datenerhebung zum aktuellen Projekt dauert von Februar 2017 bis Ende März 2017. Es werden insgesamt 20 Personen an der Studie teilnehmen.

Die Studie wird nach international anerkannten Grundsätzen durchgeführt.

4. Freiwilligkeit der Teilnahme

Ihre Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können Ihre Einwilligung zur Teilnahme an dieser Studie jederzeit zurückziehen, ohne Angabe von Gründen. Im Falle eines Widerrufs werden die bis zu diesem Zeitpunkt erhobenen Daten weiter verwendet. Bei einem vorzeitigen Ausstieg werden die Videoaufnahmen, sowie die Daten auf Verlangen gelöscht.

5. Studienablauf

Zunächst werden Sie eine Checkliste über Ihre persönlichen Angaben wie Gewicht, Grösse, Laufstil und dominantes Bein, Verletzungsgeschichte sowie wöchentliche sportliche Aktivität ausfüllen. Anschliessend wird die individuelle maximale Laufgeschwindigkeit anhand eines kurzen Rampentestes ermittelt (2 min. Einlaufen bei 7km/h gefolgt von 1km/h Geschwindigkeitssteigerung pro Minute ab 8km/h bei 1% Steigung bis zur maximalen Laufgeschwindigkeit). Nach einer Erholungspause werden Sie mit retroreflektierenden Markern abgeklebt und eine statische Aufnahme wird vor Beginn des Laufes gemacht. Während des Laufes über 42 Minuten bei 75% ihrer maximalen Laufgeschwindigkeit werden alle 7 Minuten Aufnahmen von 10 Doppelschritten, die Herzfrequenz und das individuelle Belastungsempfinden nach Borg erfasst. Der angegebene RPE-Wert (Received Perception of Execution) basiert auf der Annahme, dass das Belastungsempfinden mit der Herzfrequenz zusammenhängt. Die Werte gehen von 6 (sehr, sehr leichte Belastung) bis 20 (maximale Belastung). Dem Proband wird jeweils kurz vor der Aufnahme die Borgskala gezeigt und dieser wählt eine Zahl, welche sein Belastungsempfinden widerspiegelt.

Insgesamt nehmen die Tests maximal 120 min in Anspruch. Die Messung ist einmalig durchzuführen.

6. Pflichten der Probanden und der Prüferin

Als Teilnehmer ist es notwendig,

- den Anweisungen Ihres Prüfers/Ihrer Prüferin zu folgen und sich an den Studienplan zu halten,
- die Checkliste pflichtbewusst und ehrlich beantworten, und bei unerwarteten Auftreten von Beschwerden rechtzeitig zu informieren

7. Nutzen

Sie erhalten detaillierte Informationen zu Ihren Laufbewegungen und Ihrem Laufstil.

8. Risiken und Unannehmlichkeiten

Es bestehen grundsätzlich keine Risiken oder Unannehmlichkeiten. Es handelt sich bei der Messung um eine submaximale Belastung. Um die retroreflektierenden Marker an Ihnen anzubringen, werden Sie gebeten, dazu geeignete Bekleidung anzuziehen und werden während der gesamten Dauer des Laufes die Marker tragen. Die Marker werden mit hautverträglichem Tape angebracht und stellen keine Behinderung während der Belastung dar. Es können leichte Rötungen der Haut durch das aufkleben der Marker entstehen, welche jedoch schnell wieder verschwinden.

9. Vertraulichkeit von Daten

In dieser Studie werden persönliche Daten von Ihnen erfasst. Diese Daten werden verschlüsselt. Sie sind nur Fachleuten zur wissenschaftlichen Auswertung zugänglich. Ebenso kann die zuständige Ethikkommission Einsicht in die Originaldaten nehmen. Während der ganzen Studie und bei den erwähnten Kontrollen wird die Vertraulichkeit strikt gewahrt. Ihr Name wird in keiner Weise in Rapporten oder Publikationen, die aus der Studie hervorgehen, veröffentlicht.

10. Kosten

Die in dieser Probandeninformation erwähnten Untersuchungen sind kostenlos.

11. Entschädigung für die Probanden

Für die Teilnahme an dieser klinischen Studie erhalten Sie keine Entschädigung.

12. Kontaktpersonen

Bei Unklarheiten, Notfällen, unerwarteten oder unerwünschten Ereignissen, die während der Studie oder nach deren Abschluss auftreten, können Sie sich jederzeit an die untenstehende Kontaktperson wenden:

Prüfer/Prüferin:

Dr. Marlene Mauch
Praxisklinik Rennbahn AG
Kriegackerstrasse 100
CH-4132 Muttenz
Tel Zentrale: +41 61 465 6464
Tel Direkt: +41 61 465 6499
marlene.mauch@rennbahnklinik.ch

Masterkandidatin:

Tabitha Ingold
Tel. +41 79 506 53 63
tabitha.stalder@unifr.ch

21. 01.2017, Tabitha Ingold

Einwilligungserklärung

Schriftliche Einwilligungserklärung zur Teilnahme an einem Studienprojekt

Bitte lesen Sie dieses Formular sorgfältig durch. Bitte fragen Sie, wenn Sie etwas nicht verstehen oder wissen möchten.

BASEC-Nummer:	2017-00262
Titel der Studie:	Der Einfluss zunehmender Ermüdung beim Laufen auf die Entwicklung der Kinematik und Kinetik der unteren Extremitäten bei trainierten Läufern
verantwortliche Institution:	Didier Staudenmann University of Fribourg Department of Medicine Movement and Sport Science Bd. de Pérolles 90 CH-1700 Fribourg
Ort der Durchführung:	Praxisklinik Rennbahn AG, Kriegackerstrasse 100, 4132 MuttENZ
Leiter / Leiterin der Studie am Studienort: Name und Vorname in Druckbuchstaben:	Mauch Marlene
Teilnehmerin/Teilnehmer: Name und Vorname in Druckbuchstaben: Geburtsdatum:	

- Ich wurde von der unterzeichnenden Prüfperson mündlich und schriftlich über den Zweck, den Ablauf des Projekts, über mögliche Vor- und Nachteile sowie über eventuelle Risiken informiert.
- Ich nehme an diesem Projekt freiwillig teil und akzeptiere den Inhalt der zum oben genannten Projekt abgegebenen schriftlichen Information. Ich hatte genügend Zeit, meine Entscheidung zu treffen.
- Meine Fragen im Zusammenhang mit der Teilnahme an diesem Projekt sind mir beantwortet worden. Ich behalte die schriftliche Information und erhalte eine Kopie meiner schriftlichen Einwilligungserklärung.
- Ich bin einverstanden, dass die zuständigen Fachleute der Projektleitung/ des Auftraggebers der Studie und der für dieses Projekt zuständigen Ethikkommission zu Prüf- und Kontrollzwecken in meine unverschlüsselten Daten Einsicht nehmen dürfen, jedoch unter strikter Einhaltung der Vertraulichkeit.
- Bei Studienergebnissen oder Zufallsbefunden, die direkt meine Gesundheit betreffen, werde ich informiert. Wenn ich das nicht wünsche, informiere ich meinen Prüfarzt.
- Ich weiss, dass meine gesundheitsbezogenen und persönlichen Daten nur in verschlüsselter Form zu Forschungszwecken **für dieses Studienprojekt** weitergegeben werden können.
- Ich kann jederzeit und ohne Angabe von Gründen von der Teilnahme zurücktreten, ohne dass ich deswegen Nachteile bei der weiteren medizinischen Behandlung/Betreuung habe. Die bis dahin erhobenen Daten und Proben werden für Auswertung zur Studie noch verwendet.

Ort, Datum	Unterschrift Teilnehmerin/Teilnehmer

Bestätigung der Prüfperson: Hiermit bestätige ich, dass ich dieser Teilnehmerin/ diesem Teilnehmer Wesen, Bedeutung und Tragweite des Projekts erläutert habe. Ich versichere, alle im Zusammenhang mit diesem Projekt stehenden Verpflichtungen gemäss des geltenden Rechts zu erfüllen. Sollte ich zu irgendeinem Zeitpunkt während der Durchführung des Projekts von Aspekten erfahren, welche die Bereitschaft der Teilnehmerin/ des Teilnehmers zur Teilnahme an der Studie beeinflussen könnten, werde ich sie/ ihn umgehend darüber informieren.

Ort, Datum	Ingold Tabitha
------------	----------------

	Unterschrift der Prüfperson

Checkliste Testperson

Testdatum: _____ Testzeit: _____

PERSONALIEN

Name, Vorname: _____ Sportart: _____
Geburtsdatum: _____ Dominantes Bein: _____
Grösse [cm] / Gewicht [kg]: _____ Laufstil (Vorfuss, Mittelfuss, Fersenläufer) _____
Laufbestzeit 10km _____

GESUNDHEIT

Verletzungen letzte 6 Monate: _____

Hat Ihnen jemals ein Arzt gesagt, sie hätten „etwas am Herzen“ und Ihnen nur unter medizinischer Kontrolle Bewegung und Sport empfohlen? ☐ ja ☐ nein

Hatten Sie im letzten Monat Schmerzen in der Brust in Ruhe oder bei körperlicher Belastung? ☐ ja ☐ nein

Haben Sie Probleme mit der Atmung in Ruhe oder körperlicher Belastung? ☐ ja ☐ nein

Hat Ihnen jemals ein Arzt ein Medikament gegen hohen Blutdruck oder wegen eines Herz- oder Atemproblems verschrieben? ☐ ja ☐ nein

Befinden Sie sich momentan in ärztlicher Behandlung? ☐ ja ☐ nein

Wenn eine der Fragen mit JA beantwortet wurde, hier bitte Details notieren (Diagnose, Medikamente etc.): _____

TRAINING:

Trainingsumfang Laufen[km/W]: _____ Trainingsanzahl [Einheiten/W]: _____

VORBELASTUNG:

	Trainingsart / Sportart	Dauer			Intensität		
heute:	_____	<input type="checkbox"/> <60'	<input type="checkbox"/> 60-120'	<input type="checkbox"/> >120'	<input type="checkbox"/> locker	<input type="checkbox"/> mittel	<input type="checkbox"/> hart
gestern:	_____	<input type="checkbox"/> <60'	<input type="checkbox"/> 60-120'	<input type="checkbox"/> >120'	<input type="checkbox"/> locker	<input type="checkbox"/> mittel	<input type="checkbox"/> hart
vorgestern:	_____	<input type="checkbox"/> <60'	<input type="checkbox"/> 60-120'	<input type="checkbox"/> >120'	<input type="checkbox"/> locker	<input type="checkbox"/> mittel	<input type="checkbox"/> hart

WEITERE EINFLUSSFAKTOREN:

Befindlichkeit: _____
Wie fühle ich mich heute: 1 = katastrophal, 10 = super

Beschwerden am Testtag: _____

Krankheit (letzte 14 Tage): _____

Weitere Faktoren
(Schlaf, Reisen,
Höhenaufenthalt,...) _____

Ich habe diesen Checkliste wahrheitsgetreu ausgefüllt.

Datum: _____ Unterschrift: _____

Berechnung der Segmente:

Zur Berechnung des Beckensegmentes wurden die Marker RASI, LASI sowie der Mittelpunkt zwischen LPSI und RPSI (=SACR) verwendet. Die Strecke zwischen RASI und LASI ergibt die y- Achse. die vertikal verlaufende Linie auf Höhe des SACR ergibt die z- Achse und die nach vorne verlaufende Linie die x- Achse. Der Koordinatenursprung ist das Gelenkzentrum des Beckens.

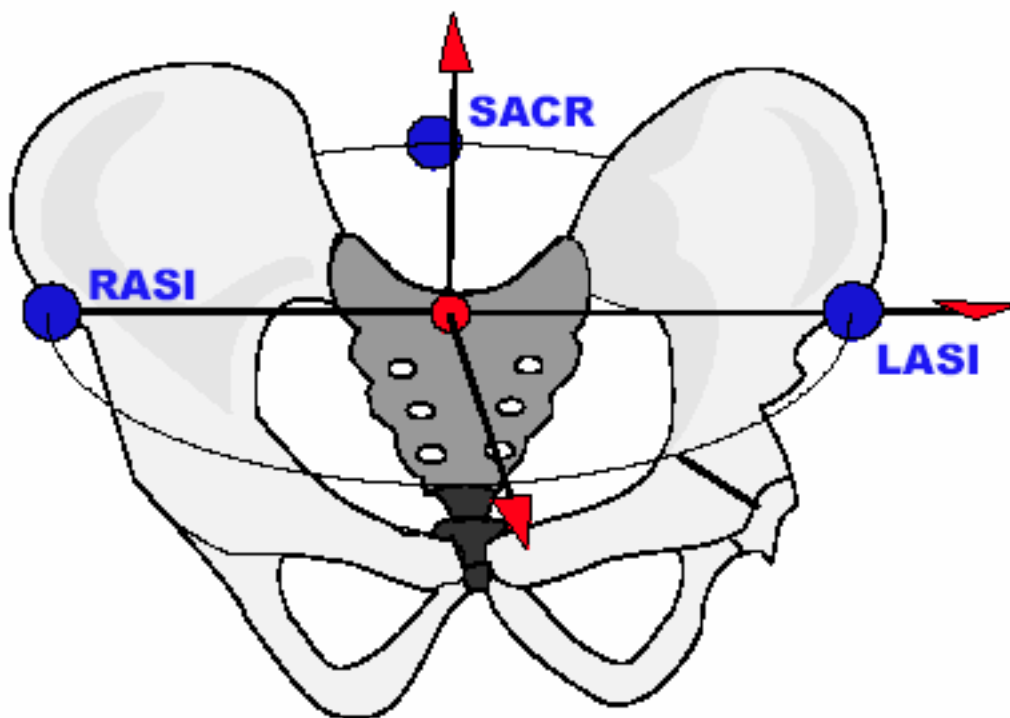


Abbildung 26. Schematische Darstellung zur Berechnung des Beckens (Plug- In Gait Manual S. 29)

Zur Berechnung des Oberschenkelsegmentes wurden die Distanz zwischen Hüftgelenkszentrum (HJC) und Kniegelenkszentrum (KJC) (z- Achse), der Marker RKNEL sowie die Distanz zwischen dem Marker RKNEL und des Kniegelenkzentrums (y- Achse) verwendet.

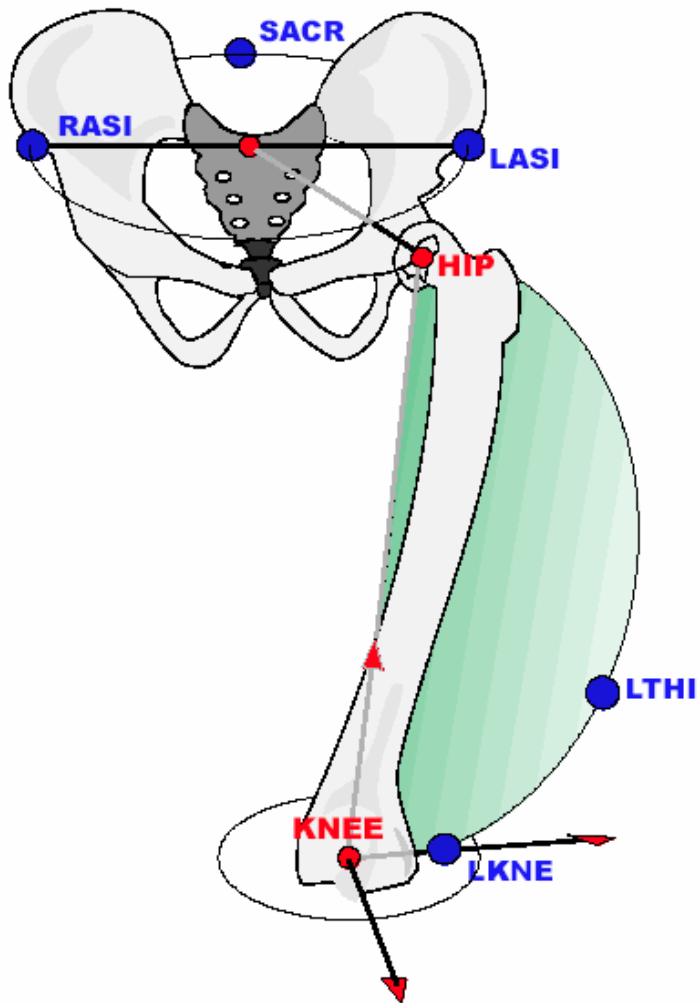


Abbildung 27. Schematische Darstellung zur Berechnung des Femurs, L steht jeweils für die linke Seite (Plug- In Gait Manual S. 33)

Das Tibia- Segment wurde aus dem Marker RMAL, der Distanz zwischen KJC- Fussgelenkszentrum (AJC) und der Distanz zwischen RMAL-KJC ermittelt.

Der Fuss wurde anhand des RHE2 Markers, der Distanz zwischen AJC-RHE2 und der Distanz zwischen AJC-KJC berechnet.

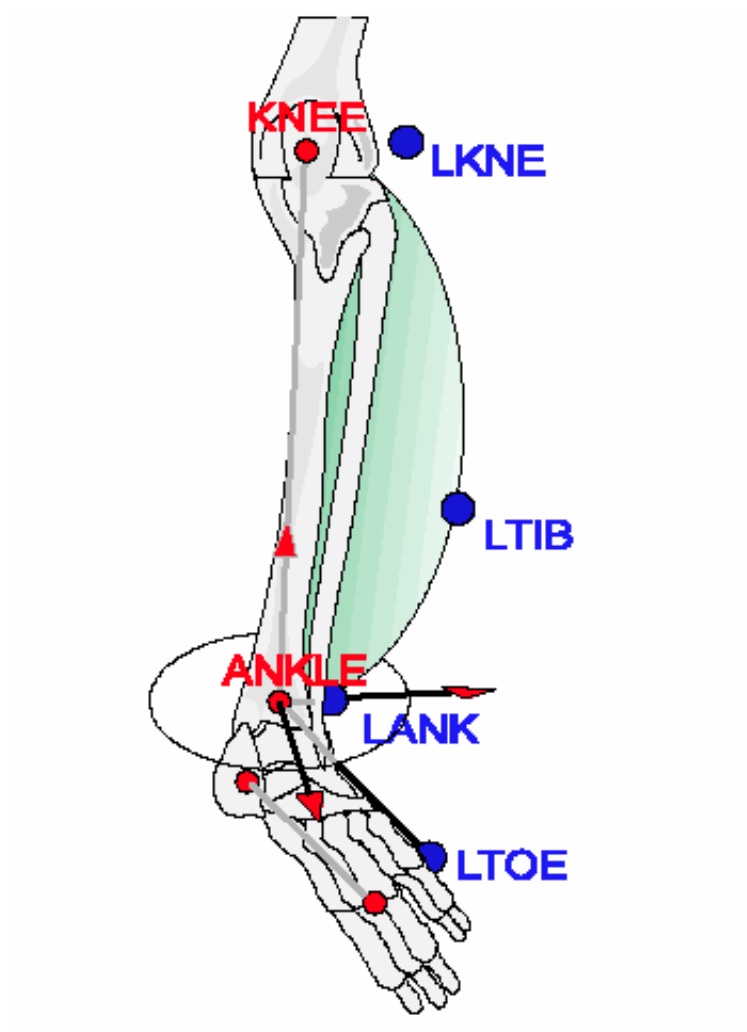


Abbildung 28. Schematische Darstellung zur Berechnung des Fussesegmentes, L steht jeweils für die linke Seite, LTOE entspricht RHE2 (Plug- In Gait Manual S. 36)

Matlab Script mit den Berechnungen zu den Mittelwerten und p-Werten:

```
%% parameterize data

load KIN

%% Bedingungen bestimmen
DAT=DAT(:,[1:2:7],:,:);

% Messzeitpunkte;
cc={'m1';'m2';'m3';'m4'};

t=linspace(1,100,51);

%% loop over files (conds)
for i=1:18:length(conds);

    cond=conds{i}

    dat=DAT(:, :, :, i); %% daten von cond bestimmen

%% Kurven aller Probanden (length(dat,3)) anschauen
    for j=1:17
        %length(dat,3),
        figure,plot(t,dat(:, :, j)), title([cond ' : s=' num2str(j)]),;
        hold on, plot(ones(2,1)*[10 60 90],ylim,'k');
    end

%% Parameter bestimmen
    mifc=squeeze(min(dat(1:7, :, :)))';
    mims=squeeze(min(dat(4:40, :, [1:3 6 8:14 16:17])))';
    mito=squeeze(min(dat(47:51, :, :)))';
    mafc=squeeze(max(dat(1:7, :, :)))';
    mams=squeeze(max(dat(4:40, :, [1:3 6 8:14 16:17])))';
    mato=squeeze(max(dat(47:51, :, :)))';

%% Verteilung testen
    for j=1:4,
        [h pmifc(j)]=kstest(mifc(:,j));
        [h pmims(j)]=kstest(mims(:,j));
        [h pmito(j)]=kstest(mito(:,j));
        [h pmafc(j)]=kstest(mafc(:,j));
        [h pmams(j)]=kstest(mams(:,j));
        [h pmato(j)]=kstest(mato(:,j));

    end

    KSH(i, :, :)=h;

    KSPMIFC(i, :, :)=pmifc(j);
    KSPMIMS(i, :, :)=pmims(j);
    KSPMITO(i, :, :)=pmito(j);
    KSPMAFC(i, :, :)=pmafc(j);
    KSPMAMS(i, :, :)=pmams(j);
    KSPMATO(i, :, :)=pmato(j);
```

```

%% statistischer Test
p(1)=friedman(mifc,1,'off');
p(2)=friedman(mims,1,'off');
p(3)=friedman(mito,1,'off');
p(4)=friedman(mafc,1,'off');
p(5)=friedman(mams,1,'off');
p(6)=friedman(mato,1,'off');

P(i,:)=p;

%     PMI(:,i)=p(1);
%     PMA(:,i)=p(2);
%     PRA(:,i)=p(3);

%%post hoc test
c=combnk(1:4,2); c=flipud(c);

for j=1:length(c)
    ppmifc(j)=signrank(mifc(:,c(j,1)),mifc(:,c(j,2)));
    ppmims(j)=signrank(mims(:,c(j,1)),mims(:,c(j,2)));
    ppmito(j)=signrank(mito(:,c(j,1)),mito(:,c(j,2)));
    ppmafc(j)=signrank(mafc(:,c(j,1)),mafc(:,c(j,2)));
    ppmams(j)=signrank(mams(:,c(j,1)),mams(:,c(j,2)));
    ppmato(j)=signrank(mato(:,c(j,1)),mato(:,c(j,2)));

    %programmieren, dass gr^sseres zuerst steht
    %mi bereits mean von mi, sollten dan nicht die %ver%nderungen davon
    %stehen zwischen boxplot?

    mm=mean(mifc(:,c(j,:)));
    pdmifc(j)=100-mm(1)/mm(2)*100;
    mm=mean(mims(:,c(j,:)));
    pdmims(j)=100-mm(1)/mm(2)*100;
    mm=mean(mito(:,c(j,:)));
    pdmito(j)=100-mm(1)/mm(2)*100;

    mm=mean(mafc(:,c(j,:)));
    pdmafc(j)=100-mm(1)/mm(2)*100;
    mm=mean(mams(:,c(j,:)));
    pdmams(j)=100-mm(1)/mm(2)*100;
    mm=mean(mato(:,c(j,:)));
    pdmato(j)=100-mm(1)/mm(2)*100;

end

%%Post-hoc Bonferroni Korrektur *4
PP(:, :, i)=[ppmifc;ppmims;ppmito;ppmafc;ppmams;ppmato];
PPBK=PP*4;
PD(:, :, i)=[pdmifc;pdmims;pdmito;pdmafc;pdmams;pdmato];
%PDBK=PD*4;

%5 get(gcf)
figure('position',[360 278 560 420],'name',cond),
subplot(311)

```

```

        boxplot(mifc,cc), title(sprintf([cond ', mi foot contact
(p=%0.3f)'],p(1)))
        ylabel('min Winkel (grad)'), xlabel('Zeitfenster')

text(1.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(1,1,i)), 'horizontalalignment','cent
er')

text(2.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(1,4,i)), 'horizontalalignment','cent
er')

text(3.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(1,6,i)), 'horizontalalignment','cent
er')


        subplot(312)
        boxplot(mims,cc), title(sprintf([cond ', mi mid stance
(p=%0.3f)'],p(2)))
        ylabel('min Winkel (grad)'), xlabel('Zeitfenster')

text(1.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(2,1,i)), 'horizontalalignment','cent
er')

text(2.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(2,4,i)), 'horizontalalignment','cent
er')

text(3.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(2,6,i)), 'horizontalalignment','cent
er')


        subplot(313)
        boxplot(mito,cc), title(sprintf([cond ', mi toe off (p=%0.3f)'],p(3)))
        ylabel('min Winkel (grad)'), xlabel('Zeitfenster')

text(1.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(3,1,i)), 'horizontalalignment','cent
er')

text(2.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(3,4,i)), 'horizontalalignment','cent
er')

text(3.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(3,6,i)), 'horizontalalignment','cent
er')
%
        figure('position',[360 278 560 420], 'name',cond),;
        subplot(311);
        boxplot(mafc,cc), title(sprintf([cond ', max foot contact
(p=%0.3f)'],p(4)));
        ylabel('min Winkel (grad)'), xlabel('Zeitfenster');

text(1.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(4,1,i)), 'horizontalalignment','cent
er');

text(2.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(4,4,i)), 'horizontalalignment','cent
er');

text(3.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(4,6,i)), 'horizontalalignment','cent
er');


        subplot(312);
        boxplot(mams,cc), title(sprintf([cond ', max mid stance
(p=%0.3f)'],p(5)));
        ylabel('max Winkel (grad)'), xlabel('Zeitfenster');

```

```

text(1.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(5,1,i)), 'horizontalalignment','center');

text(2.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(5,4,i)), 'horizontalalignment','center');

text(3.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(5,6,i)), 'horizontalalignment','center');


    subplot(313);
    boxplot(mato,cc), title(sprintf([cond ', max toe off
(p=%0.3f)'],p(6)));
    ylabel('max Winkel (grad)'), xlabel('Zeitfenster');

text(1.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(6,1,i)), 'horizontalalignment','center');

text(2.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(6,4,i)), 'horizontalalignment','center');

text(3.5,mean(ylim),sprintf('%.0f%%',PD(6,6,i)), 'horizontalalignment','center');
%

end

```

```

% -----
% MATLAB version: 8.4.0.150421 (R2014b)
% -----
saveVarsMat = load('matlab22.mat');

DAT = saveVarsMat.DAT; % <51x4x17x18 double> too many elements

KSH = logical([1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 0; 1]);

KSPMAFC = [2.1373221343900968E-16; 3.2692851175021177E-15;
7.357605732879078E-13; ...
2.1373221343900968E-16; 2.2923914270707528E-8;
2.1184333777179987E-6; ...
4.210404675458617E-14; 0.12820046344820923;
2.1373390842855899E-16; ...
2.8598776594046965E-8; 1.8573437102943108E-8;
2.1383892678281654E-16; ...
2.1373221343900968E-16; 1.2445150534302561E-8;
8.0891438070107569E-7; ...
2.948626452435964E-11; 2.4666392584975661E-16;
2.1402240561094041E-16; ...
];

KSPMAMS = [7.5639452860624722E-13; 7.5639452860641655E-13;
0.033675156296580355; ...
7.5639452860624722E-13; 0.38459628905940291;
3.5282689249016563E-5; ...
7.5639452860624722E-13; 0.00058947728745084582;
7.5826724201347151E-13; ...

```

```

0.000471856741797394; 0.026304691134341196;
7.5651279563343913E-13; ...
7.5639452860624722E-13; 3.1912840299999766E-9;
0.0032237294759780433; ...
5.21244648817851E-11; 1.7725950285374381E-6;
7.5645263463245439E-13; ...
];

KSPMATO = [0.0026177529664633825; 0.00039605058503922042;
2.3515034741627971E-7; ...
2.1373221344291414E-16; 0.00722834846409981;
6.6656703521042259E-13; ...
2.1373221343900968E-16; 2.2478002285124729E-16;
2.1373221343900968E-16; ...
2.1373221343900968E-16; 9.320376964249983E-10;
6.5722501606524375E-6; ...
2.1373221343900968E-16; 2.7864947824289586E-14;
2.3096808458714052E-9; ...
3.6213123723718543E-12; 0.074305590074422279;
2.1373221671291292E-16; ...
];

KSPMIFC = [2.1373221343900968E-16; 2.1889314410351173E-14;
2.2163532051068429E-16; ...
2.1373221343900968E-16; 8.6298114470906682E-13;
7.4916285310996791E-13; ...
5.7755258755509686E-6; 2.7462620159957041E-5;
2.359086795822356E-14; ...
1.3689323519194829E-7; 2.5250410460882419E-9;
3.8687879178727759E-16; ...
2.1373223958992561E-16; 0.0016775333340199872;
1.9830721307675619E-11; ...
2.250316957865166E-12; 2.2708393971024938E-16;
2.1373221345643781E-16; ...
];

KSPMIMS = [5.2067716540164715E-11; 5.0493981636701157E-5;
7.5639454904056679E-13; ...
7.5639452860624722E-13; 7.7046296106701927E-13;
7.6865002872594174E-13; ...
5.8872252961528204E-8; 3.7108976609356858E-6;
4.6665313409022247E-6; ...
7.5639452860624722E-13; 1.3442693465481167E-7;
1.340217897416381E-12; ...
7.5736572630565551E-13; 1.5310813576308036E-5;
1.6684561960966583E-12; ...
5.2043201219571967E-11; 7.8013133636100945E-13;
7.5639452860627943E-13; ...
];

KSPMITO = [5.1920420328643857E-6; 1.1677433369842306E-7;
1.7910984806412955E-7; ...
2.1380369232823024E-16; 2.1108840557726438E-6;
4.7388119758920919E-15; ...
2.1373221343900968E-16; 2.7475321149225469E-16;
2.1373221343906892E-16; ...
2.1373221343900968E-16; 2.1940296113243107E-7;
0.083090604360952169; ...
2.1373221343900968E-16; 9.2865499137034852E-16;
1.7515498988984746E-6; ...

```

```

1.6537145112787664E-12; 0.0058908091305127641;
2.1373338919038244E-16; ...
];

P = ...
[0.92783996566402693 0.9370463747909632 2.0444645573287802E-6
0.55549112538982 ...
0.67695452180417193 0.0032975928627411422;
0.051947825254751334 0.808696613402605 0.46162949649328444
0.40263702571731252 ...
0.03610039041604151 0.40263702571731252;
0.94266194086688793 0.000829534654107769 0.39162517627108895
0.55549112538982 ...
0.046330731652475442 0.37036654602395058;
0.5136487462354058 0.313845312236946 0.00019974193645742704
0.956676087328188 ...
0.033208569722817369 7.260311826626051E-5;
0.40263702571731252 0.00012017767123597968 0.79555878770365618
0.54127686757581039 ...
0.65590651432351277 0.18426271291359422;
0.74455236036524708 0.28032738167744092 0.051947825254751445
0.79555878770365573 ...
0.31384531223694595 0.956676087328188;
0.024948396117838181 0.91719822422410047 0.050331097859853291
0.14474357941485586 ...
0.39162517627108878 0.012650671641366722;
0.24782481317006097 0.12339363732542673 0.00099794583804424584
0.08317232155295555 ...
0.89643237334191117 3.6894155492479281E-5;
0.40263702571731252 0.29112568519125531 0.0012188624168634765
0.0032975928627411422 ...
0.15668815404052985 1.4263292708221209E-5;
0.4372366871451131 0.63522497583280135 0.81263666262715073
0.32152584402126327 ...
0.59505659362405039 0.66206032025257722;
0.15379669601227505 0.06715252030632779 0.28663488412669763
0.12812970688049449 ...
0.31384531223694595 0.10990565877943297;
0.053615002154518754 0.14474357941485594 0.060818862938993461
0.0008732574764567225 ...
0.0019814089391671438 0.20761638792291606;
0.67820342859965466 0.25006766234133249 0.99112229429353249
0.79555878770365573 ...
0.25006766234133243 0.35010634866335744;
0.035485575430248557 0.91719822422410047 0.032243024467318616
0.094175986015732 ...
0.51992913228349724 0.083172321552955591;
0.019279294444092619 0.00787283941553442 0.51364874623540557
0.064764528921746917 ...
0.19832613141365216 0.15379669601227489;
0.50023842388463713 0.59505659362405061 0.54127686757581006
0.35010634866335744 ...
0.55659547156094469 0.82968422650360651;
0.25080490895468577 0.023207980230000338 0.24352092899976244
0.28609627401289306 ...
0.26909697209832062 0.17007219182662942;
0.14040838800341943 0.075925850377015408 0.032243024467318658
0.094175986015732072 ...
0.24066188520961562 0.014881086386441384];

```

```

PD = reshape([1.0596273492959227 -6.2770966187799928 189.35999658336431
...
0.85897120737685384 1.0650708341337349 -
182.10608459407933 ...
0.26373844124883306 -10.581220218935798
144.84972753592012 ...
1.1673949403578945 1.1955306527334244 -499.30202276620253
...
0.19810656219276268 -7.90600643656758 153.47153402053442
...
1.3018550689570247 1.4425294719350745 -257.25519212840447
...
-0.80441268485702722 -4.04990702333059 49.810061268210085
...
0.31109595768485576 0.13186426644222138 -
112.43853128107273 ...
-0.87074746538972647 -1.5327007131466388
40.161665101843894 ...
0.44672106692232205 0.38152211861245178 -
26.638598611744484 ...
-0.065805433280075931 2.4192297544480539 -
19.223765579643896 ...
0.13604835015529204 0.2499874963484956 40.388121755468276
...
13.032749586346995 7.981856410648092 11.613916588880684
6.5921736741248509 ...
7.3058309171126723 12.099740947694613 11.839668646150656
...
19.047788671957079 11.969081625576081 5.7791220444709523
...
8.8114146203488986 17.822103074944579 9.6200947053072525
...
1.3180255241914409 27.38135742544145 5.7221999919906068
9.1668731303327036 ...
32.915609222824472 -1.3718738197672451 12.025815594251455
...
0.40183366316095714 -0.87043202013647658
1.6242485564436464 ...
6.5100628700591727 -3.9240689625206215 -
7.2418662521548356 ...
17.839279927384084 -0.93137129548345854
2.0077230656826828 ...
23.681236551013228 -2.5176560781455066 -
21.901518015263662 ...
17.507798492243339 -0.060413417615578169
0.38980592637103939 ...
18.366868358343197 2.0668178501934023 15.165689170089763
...
7.05156911884994 1.722869566368658 1.6056411253522924
3.6937211918953778 ...
5.4916427954863849 20.591926126927675 6.0725282091882491
...
4.2598836615718909 0.40755933042079562 2.1193726012855905
...
1.2740537541550907 16.0269958689274 0.2743091722520461 -
3.0234448592643588 ...
-112.42122407315821 -11.573188233927098
3.4971037089901671 ...
6.3962763459201426 -1.0533162317861553 2.5814897972794739
...

```

-1.217632604789685 -1.6347309958333796 -
 0.80949488072963049 ...
 1.0152810701374477 -7.2914194272561019 -
 4.8295207691664359 ...
 -115.88760423123264 -15.852454912355824 -
 4.4626625264520641 ...
 -5.7486978783756371 -6.1730811299271124 -
 7.6073946840535314 ...
 -113.29050944530459 -13.989040731662229
 0.16509161530348138 ...
 -0.793627347476729 -12.356775312114237 1.727409683761465
 ...
 2.026399224482347 -16.804376142676134 -2.3904575289941619
 ...
 -3.705816357844256 -18.51675466978034 -1.3978058930040191
 ...
 3.0330273829087986 -17.71368547459582 1.0174325563541942
 ...
 -3.8764548661251155 -19.82662864227494
 0.55673631200522777 ...
 1.4375323893345495 -17.641076069483859 -
 2.5597751183887141 ...
 -2.8892590603253581 -5.4825170449706917 -
 3.1801497922346584 ...
 1.0274483641087073 -0.77848909599839544
 0.85375041139555208 ...
 -3.0585539976854221 -6.64833367583779 -1.191251159645887
 ...
 -0.60104643545462011 -0.71632583849914511
 3.3283278223298538 ...
 -0.16454092381090391 -1.105222612738828
 1.9275981248269858 ...
 -1.6454004394616248 0.061683061590684929
 0.39830259412264013 ...
 12.363761013525405 -8.2747270752910822 -
 8.3581572404062285 ...
 -19.915492205369233 -22.161782755986039 -2.09942389956322
 ...
 15.374502567354568 -6.3514267357471965 -
 11.823770045926679 ...
 -16.877362768712231 -33.607175305547145
 9.1899944626069043 ...
 21.732090817544872 5.8160056674724814 -3.7443162426234551
 ...
 770.29468482851814 -30.578536118882909 -2.50771478673461
 ...
 3.4354983607795333 1.7763151120265235 -3.1982943359137437
 ...
 2.5335587427301363 -9.3690451230749545 8.8268494387782113
 ...
 10.690018093388659 13.013870478717791 4.2579544681129846
 ...
 658.97255016938141 -6.8898416288742652 11.057279200003805
 ...
 7.5126155154956393 11.440779664810961 7.2251667064926579
 ...
 673.50257479282755 2.2668237538425871 12.812022020010119
 ...
 3.1101309020110648 8.2015067254287 6.4784209928879619
 1.1482547308550863 ...

9.58289315088787 12.964483073958576 3.8380596486244656
 12.223872479357496 ...
 3.97959546718954 -4.828514223185536 12.821156749137685
 14.809071764412892 ...
 8.5415650569953669 13.904139799015809 -4.8245389044194127
 ...
 -14.000133362201538 14.047480918734621
 0.17486476631383141 ...
 0.75129500472046118 4.3817339592904005 -
 2.6719240117923988 ...
 -6.0461946703799612 3.58147225795868 2.2905104472787485
 5.6057812912217457 ...
 6.2121205590274826 -12.085937830933986 -
 15.324350674651129 ...
 4.9377688840423133 2.1193516803280943 4.8912338823284074
 ...
 1.9142645809512828 -9.1690244531312572 -
 8.7491644873351362 ...
 1.4066763492928231 -89.302474336978719
 0.57854287974275564 ...
 5.8102768296057974 -18.89240064480957 0.33298275545318745
 ...
 8.3255169172240784 -40.102756577445376 -
 7.0985189553403529 ...
 9.1128166832082655 -1.4626277020115026 1.160136861919085
 ...
 14.718277686395936 -18.218972351867492 -11.734424770836
 9.9061621412723611 ...
 -2.3830293697569402 0.71441224914951817
 13.466733194629995 ...
 25.990002471891927 -7.7217353853476 3.5062634674358151
 14.660123648162681 ...
 0.82991758892147516 6.9733262236118634 37.550223384072069
 ...
 -12.3846179760626 4.3485479878276152 13.885976887937773
 0.38270383145955122 ...
 5.6081213708767024 15.619809888238038 -4.3286367175897453
 ...
 0.87289035605697052 -0.90713367925832245 -
 0.450956323307409 ...
 -1.4675412946793642 -11.987716363316721 -
 5.7101740903832621 ...
 12.901095331544639 -56.087079170295169 -
 25.400628054429177 ...
 11.240950179602933 8.2275461028165324 -1.377290025461761
 ...
 24.498166832593526 11.981992094334259 -1.17018605846107
 18.384441277310117 ...
 2.6917607474236718 0.381429867834882 24.886458334481858
 30.184093117607333 ...
 -24.11363133122839 21.611643427525706 18.051321272191828
 ...
 4.0988335344305113 13.314830473693675 43.609677127960254
 ...
 19.32242475328836 8.0481833820460622 13.108113628387969
 5.7625521957893682 ...
 13.760635737682207 55.271181155089941 1.02630803622624
 11.684096741580433 ...
 -6.0320772958679214 1.734826303657286 0.51428089305777291
 ...

20.679973855783444 -22.678069663239995 3.9541506554906363
 ...
 5.6207506106995879 0.771561907893286 5.634381796824357
 8.0719272712084376 ...
 1.8566738732748007 5.6565254248904893 10.14408205504796 -
 7.0361736635650374 ...
 8.8444026701341585 10.409972921297481 7.0623533252629329
 ...
 8.5675343093860619 5.3785560492265176 -13.740907568873965
 ...
 12.917658347285212 8.3051701380456961 4.1222056149404409
 ...
 12.789280223488049 4.7927181807627051 -7.8684454996771791
 ...
 3.4016847814194477 2.5433423987760619 5.3041604125648121
 ...
 3.0855434332959959 -0.25661844424516289 -
 14.625312819391922 ...
 7.7181463854551993 0.25372322068079711 2.3083910349037211
 ...
 7.5604113911651325 -5.3035193616751286 -
 6.2639887767131768 ...
 4.46846468726558 -2.3493717458113537 -3.1635702167200463
 ...
 4.6173379250072912 22.684528411797174 -
 0.046503125302166382 ...
 0.53601206301789261 -8.0223618338048226 -
 54.169661423157891 ...
 0.76770995686274546 -5.1179353971680968
 1.8884288656169588 ...
 2.2011519182135686 14.857851799181375 53.805145852715214
 ...
 3.16120695755923 10.89840860695972 0.47498420810248376
 1.6349482383684233 ...
 0.99967047145837284 40.261528465797156 2.151302395574703
 ...
 -35.959767479718153 1.9340326053133055 1.674113304456128
 ...
 21.180997382919642 70.036352340107157 2.4120142744423418
 ...
 -15.244193125552698 0.52124493821791873 1.104858349382468
 ...
 8.3520042999465431 61.251473874463933 1.394296592480643
 15.236547353801342 ...
 -1.4406503138946647 -0.57894718695628455 -
 16.276522991922519 ...
 -29.3184547000331 -1.0428719010799057 5.6189306165345272
 ...
 14.102951187131126 13.676169271084547 4.1077337535709262
 ...
 -124.53645825997569 12.892956636987094 3.1681904604674997
 ...
 16.97878911850232 26.011882009534276 -6.7099768910382238
 ...
 -3421.9647537479786 22.490273348476506 -12.71354041083579
 ...
 4.4876314999010276 36.921848343701427 -40.555559908824449
 ...
 7.7229985254023177 30.010455408442 -2.596643767734605
 3.3480055148767036 ...

14.290043241000078 -11.281108548221425 -
 1468.5491706073553 ...
 11.017842347711451 -19.423885687167214 -
 11.194004706934194 ...
 26.928460978076572 -46.576533656653027 58.903332585857243
 ...
 19.651107546055542 -16.401357102409023 -
 15.045742510827552 ...
 14.745565410344696 -31.717355774845686 97.379956702394622
 ...
 9.7022430407676836 8.2033591079562456 9.4432351401622725
 ...
 -33.401955138110054 12.15829049007543 11.334908887810897
 ...
 5.5607226650839721 5.8650357185298816 9.6855670538918588
 ...
 -490.71830457465671 12.943047585464967 12.258877168122865
 ...
 -14.95153440432486 6.069668756985152 8.06011172606641
 1001.1972388284776 ...
 10.92075974621811 9.25892893592291 -26.361105480704182 -
 2.5472864439302327 ...
 0.26760222066751282 -342.81082984360347
 0.89337639233997379 ...
 1.0420880063641675 -21.720048742712137 -
 2.3243664803381989 ...
 -1.5273551525793181 775.55024804207312 -
 1.4088190573266388 ...
 -2.3413723776150306 -33.801432038262789
 0.21738260593949121 ...
 -1.7997736073871664 252.55955873542456 -
 2.3229481197749777 ...
 -3.4190903140688391 -9.9255491764449744
 0.96347870924063272 ...
 0.82343400190731586 2.4126917476472869 1.3573168776462694
 ...
 0.43580460172833568 3.6065173867429507 -
 1.7560127855226142 ...
 -3.2450810140487221 1.9791212603090855
 0.70805590508766159 ...
 -1.6213178868774918 3.1788090625005054 0.6526472662629601
 ...
 -0.12491095670384311 2.5505883712036166
 1.7611705616452582 ...
 1.3750692334782144 3.3488517312506474 -2.7459481202688494
 ...
 -4.1022947054189132 -0.444289831436933 -
 0.65819476113932751 ...
 -2.0661267641214067 -0.4437108325657988 -
 0.31385537267114216 ...
 -0.95621878925449266 0.14130589932837267
 0.40941068431611427 ...
 0.94337590736577681 -0.26730609633236213
 2.3670935857741142 ...
 3.0221004494348023 0.58300549662706658 1.060624470753595
 ...
 2.9485812452178806 0.17562546701157089 20.194501170139475
 ...
 -0.9309377329873314 10.119097353471517 7.58680897327973
 4.5082594912244645 ...

10.474553536759714 22.813725639766275 -4.2877139960308455
 ...
 10.01113697325404 11.636846490821767 4.6073773971329359
 12.158344425580708 ...
 16.861193802838486 -2.7674456843976856 12.886531094921295
 ...
 12.590000804059713 4.6618469170340262 13.270608022053082
 ...
 3.2820100219043695 -3.3258149963134827 -
 0.12011492657350686 ...
 4.3825318361433858 0.10379736025375053 1.8807958578708508
 ...
 -4.1767890886909242 -1.8195688979615312
 3.0790008332839847 ...
 5.4139368797830372 0.16083844004857895 3.1231952430881762
 ...
 -7.7119045921906917 1.4577635786426555 3.1952777543290551
 ...
 1.0786784710427213 0.057100348449210969
 1.2662142911571692 ...
 18.39672048988686 15.594026935810163 14.893199295866296
 21.034339354414342 ...
 -19.312057884125537 15.893005983427003 17.590155153637724
 ...
 20.2676810008374 11.701688570173772 18.266320239811733 -
 56.403875659592359 ...
 12.798277769060178 7.4682260819238451 12.883615196641898
 ...
 -7.1856968282287852 7.8815323678424818 -
 6.5400594603769235 ...
 -0.13771293892325787 -0.98839818827281078
 5.5371129499010436 ...
 -3.7500066966299528 -3.5053453513497033 -
 31.08807142651915 ...
 -3.6795135179329037 -13.39222452034987 -
 3.2111610597830804 ...
 -25.942575612553469 -16.656362878548435
 10.704700472229405 ...
 -19.059911853693734 -12.282427045681629 -
 9.2610699110269934 ...
 -21.39042649010679 -12.705640933381261 31.881445385498182
 ...
 -14.834558741540164 10.700002342036882 12.878400932400794
 ...
 9.7961343332425912 11.878607052686661 13.724183080276532
 ...
 8.5635769790944778 9.0261492898777647 12.981786662290446
 ...
 8.9993222308259959 9.7462927021009733 15.216707453281401
 ...
 8.2317203620850421 3.9703197418068896 10.648103588001192
 ...
 5.5764416548121858 6.7080538297940535 14.246252799524498
 ...
 5.843161911841392 -1.8744155610958728 0.11866831072445905
 ...
 -0.883345848347858 -2.4197465328998931 1.7299452225339422
 ...
 -0.36293700698850273 -7.5360389437030335 -
 2.5599821034839749 ...

```

-4.6779510470419581 -5.8675346019371659
0.60511709756829646 ...
-2.9751984793095971 -5.5574536073895473 -
2.681832900007322 ...
-3.7613792115879221 -3.3663313821322021 -
1.144629589871343 ...
-2.6028148938479205 10.516637389296505 8.98419679267154 -
118.68614894748202 ...
11.903833542656955 -3.1453405766444007 76.465446810343821
...
9.0750081459053 8.3980034627135325 328.92564051238827
9.96454666375449 ...
-23.876613820882426 87.242060850831692 11.85638814868058
...
14.949303166919265 -181.44273607808742 12.484065818358616
...
11.969298143137223 80.2203676867781 -1.6110584150296177 -
0.64405664653939709 ...
204.68227714200833 -2.2013294753767525 -
20.099088459389208 ...
45.790603941545683 1.4972065424191214 6.5539237847075356
...
-28.697101957598875 0.65863510188337671
14.653729034468938 ...
15.954927404717552 3.0589829551357042 7.1519180278336307
...
222.94067866236122 2.7983633793620726 28.936787064466031
...
-55.037832379936788 12.985929924781104 16.163293695239645
...
15.375631221418232 14.319939480410682 16.482754818921535
...
16.306137190260444 14.471837167468962 19.877842874112986
...
20.196486631203712 15.287528817945244 19.149165613668245
...
20.746522180037658 15.196793836600392 18.746810732006224
...
13.543016023758597 16.197985882639998 12.128493379717241
...
14.699843705386556 1.7076631875780208 4.4306955062980791
...
5.69676971227895 1.1293051518250792 3.1926469664624335
5.3055084813942557 ...
2.5408119743256492 3.081606077623178 -2.1655880263693632
...
2.1919293600404615 -5.21360759656713 -1.9192488325284529
...
0.84762333846796878 -1.4116346622191855 -
8.3373153970018876 ...
1.0747615457210458 -8.6834876686663733 -
7.6295433853226626 ...
], 6, 6, 18);

PP = reshape([0.52278101046669945 0.892578125 0.0010018794357967719
0.20967491728457333 ...
0.339599609375 0.0074817781615268558 0.86840613089886087
...
0.414306640625 0.00029305252019248997 0.20967491728457333
...

```

0.2734375 0.0035993565836257733 0.83131020797942512
 0.946044921875 ...
 0.0064899700076656314 0.35595869884657466 0.2734375
 0.019117271543546487 ...
 0.28682732924443766 0.414306640625 0.0048532308513795312
 ...
 0.3811632511856291 0.946044921875 0.049468494673688919
 0.75831237426103459 ...
 0.684814453125 0.084016752511722775 0.35595869884657466
 0.454833984375 ...
 0.33183160809268897 0.79458641266788621 0.684814453125
 0.75831237426103459 ...
 0.86840613089886087 0.892578125 0.86840613089886087
 0.0041838683298923473 ...
 0.946044921875 0.35595869884657466 0.10243436499289736
 0.03271484375 ...
 0.43475617175843212 0.0064899700076656314 0.243896484375
 ...
 0.24613691576742636 0.084016752511722775 0.01708984375
 0.43475617175843212 ...
 0.068376559524373215 0.684814453125 0.19298546891685994
 0.14879179284657834 ...
 0.0478515625 0.26594664610592478 0.554033858464435
 0.2734375 ...
 0.83131020797942512 0.72256277057075757 0.497314453125
 0.83131020797942512 ...
 0.30878760631195346 0.83935546875 0.1359220216538575
 0.86840613089886087 ...
 0.414306640625 0.1359220216538575 0.43475617175843212
 0.167724609375 ...
 0.28682732924443766 0.79458641266788621 0.892578125
 0.33183160809268897 ...
 0.79458641266788621 0.00048828125 0.28682732924443766
 0.79458641266788621 ...
 0.7353515625 0.79458641266788621 0.46310681496665418
 0.00048828125 ...
 0.24613691576742636 0.4074344560777356 0.684814453125
 0.79458641266788621 ...
 0.981116590883351 0.026611328125 0.58617434448078365
 0.6529181068049057 ...
 0.146484375 0.4074344560777356 0.6529181068049057
 0.039794921875 ...
 0.22738526970373263 0.554033858464435 0.786865234375
 0.6529181068049057 ...
 0.72256277057075757 0.339599609375 0.49245929748526951
 0.68740886937890966 ...
 0.026611328125 0.049468494673688919 0.90579409144059919
 0.7353515625 ...
 0.19298546891685994 0.4074344560777356 0.057373046875
 0.068376559524373215 ...
 0.86840613089886087 0.946044921875 0.0013967480890075107
 ...
 0.554033858464435 0.068115234375 0.0010018794357967719
 0.30878760631195346 ...
 0.375732421875 0.0011841930356640952 0.619153706689038
 0.00341796875 ...
 0.00071262670243804724 0.86840613089886087 0.414306640625
 ...
 0.00059911940116805316 0.94339205682265592 0.243896484375
 ...

```

0.00084585462266045341 0.52278101046669945 0.09423828125
...
0.03124928092967939 0.35595869884657466 0.006103515625
0.981116590883351 ...
0.619153706689038 0.21630859375 0.019117271543546487
0.94339205682265592 ...
0.83935546875 0.72256277057075757 0.1359220216538575
0.892578125 ...
0.35595869884657466 0.30878760631195346 0.146484375
0.86840613089886087 ...
0.83131020797942512 0.001708984375 0.33183160809268897
0.43475617175843212 ...
1 0.26594664610592478 0.94339205682265592 0.000732421875
...
0.981116590883351 0.28682732924443766 0.635498046875
0.14879179284657834 ...
0.24613691576742636 0.001708984375 0.52278101046669945
0.83131020797942512 ...
0.339599609375 0.061503925703185358 0.554033858464435
0.080322265625 ...
0.33183160809268897 0.26594664610592478 0.946044921875
0.94339205682265592 ...
0.084016752511722775 0.03271484375 0.35595869884657466
0.30878760631195346 ...
0.454833984375 0.75831237426103459 0.035156973095915471
0.068115234375 ...
0.554033858464435 0.30878760631195346 0.684814453125
0.86840613089886087 ...
0.12392922503869737 0.635498046875 0.10243436499289736
0.981116590883351 ...
0.454833984375 0.19298546891685994 0.35595869884657466
0.541748046875 ...
0.092859531430646625 0.79458641266788621 0.497314453125
0.68740886937890966 ...
0.33183160809268897 0.339599609375 0.021681703762710124
0.58617434448078365 ...
0.414306640625 0.24613691576742636 0.94339205682265592
0.375732421875 ...
0.10243436499289736 0.49245929748526951 0.167724609375
0.90579409144059919 ...
0.79458641266788621 0.375732421875 0.0098821253401396841
...
0.35595869884657466 0.19091796875 0.24613691576742636
0.94339205682265592 ...
0.497314453125 0.4074344560777356 0.554033858464435
0.19091796875 ...
0.619153706689038 0.05521337554271482 0.7353515625
0.039474350914502819 ...
0.12392922503869737 0.786865234375 0.068376559524373215
0.14879179284657834 ...
0.684814453125 0.005618046056498893 0.79458641266788621 1
...
0.0064899700076656314 0.33183160809268897 0.83935546875
0.005618046056498893 ...
0.52278101046669945 1 0.024540498971091267
0.28682732924443766 ...
0.946044921875 0.092859531430646625 0.021681703762710124
...
0.635498046875 0.075868334994390177 0.28682732924443766
0.83935546875 ...

```

0.044233691013677891 0.19298546891685994 0.339599609375
 0.19298546891685994 ...
 0.79458641266788621 0.786865234375 0.554033858464435
 0.90579409144059919 ...
 0.83935546875 0.3811632511856291 0.28682732924443766
 0.167724609375 ...
 0.03124928092967939 0.11277865463569878 1
 0.0041838683298923473 ...
 0.6529181068049057 0.541748046875 0.0026473530335901756
 0.46310681496665418 ...
 0.892578125 0.0016440063298259733 0.72256277057075757
 0.946044921875 ...
 0.00226333587285808 0.68740886937890966 0.454833984375
 0.00042079078167787 ...
 0.035156973095915471 0.2734375 0.024540498971091267
 0.16257175915628935 ...
 0.339599609375 0.05521337554271482 0.3811632511856291
 0.2734375 ...
 0.03124928092967939 0.17729327255318422 1
 0.0011841930356640952 ...
 0.33183160809268897 0.414306640625 0.94339205682265592
 0.68740886937890966 ...
 0.684814453125 0.092859531430646625 0.30878760631195346
 0.892578125 ...
 0.035156973095915471 0.0074817781615268558 0.684814453125
 ...
 0.039474350914502819 0.039474350914502819 0.375732421875
 ...
 0.01132237144948544 0.00035153256850746397 0.039794921875
 ...
 0.0064899700076656314 0.35595869884657466 0.167724609375
 ...
 0.00050263006458019558 0.03124928092967939 0.541748046875
 ...
 0.00029305252019248997 0.24613691576742636 0.026611328125
 ...
 0.12392922503869737 0.43475617175843212 0.068115234375
 0.11277865463569878 ...
 0.83131020797942512 0.01708984375 0.0010018794357967719
 0.43475617175843212 ...
 0.497314453125 0.0010018794357967719 0.19298546891685994
 ...
 0.414306640625 0.021681703762710124 0.20967491728457333
 0.21630859375 ...
 0.019117271543546487 0.22738526970373263 0.83935546875
 0.75831237426103459 ...
 0.19298546891685994 0.587890625 0.86840613089886087
 0.90579409144059919 ...
 0.587890625 0.17729327255318422 0.4074344560777356
 0.587890625 ...
 0.16257175915628935 0.3811632511856291 0.7353515625
 0.79458641266788621 ...
 0.86840613089886087 0.635498046875 0.79458641266788621
 0.17729327255318422 ...
 0.305419921875 0.24613691576742636 0.10243436499289736
 0.243896484375 ...
 0.14879179284657834 0.46310681496665418 0.786865234375
 0.4074344560777356 ...
 0.4074344560777356 0.19091796875 0.3811632511856291
 0.4074344560777356 ...

0.497314453125 0.22738526970373263 0.19298546891685994
 0.892578125 ...
 0.19298546891685994 0.58617434448078365 0.068115234375
 0.30878760631195346 ...
 0.79458641266788621 0.635498046875 0.17729327255318422
 0.3811632511856291 ...
 0.010498046875 0.19298546891685994 0.6529181068049057
 0.127197265625 ...
 0.16257175915628935 0.35595869884657466 0.243896484375
 0.024540498971091267 ...
 0.068376559524373215 1 0.021681703762710124
 0.79458641266788621 ...
 0.339599609375 0.22738526970373263 0.26594664610592478
 0.497314453125 ...
 0.30878760631195346 0.10243436499289736 0.243896484375
 0.039474350914502819 ...
 0.0098821253401396841 0.83935546875 0.044233691013677891
 ...
 0.084016752511722775 0.10986328125 0.1359220216538575
 0.17729327255318422 ...
 0.375732421875 0.20967491728457333 0.044233691013677891
 0.026611328125 ...
 0.52278101046669945 0.0016440063298259733 0.006103515625
 ...
 0.68740886937890966 0.084016752511722775 0.057373046875
 0.11277865463569878 ...
 0.0035993565836257733 0.010498046875 0.33183160809268897
 ...
 0.26594664610592478 0.09423828125 0.03124928092967939
 0.012946026127481585 ...
 0.080322265625 0.1359220216538575 0.22738526970373263
 0.786865234375 ...
 0.092859531430646625 0.6529181068049057 0.497314453125
 0.068376559524373215 ...
 0.43475617175843212 0.7353515625 0.035156973095915471
 0.6529181068049057 ...
 0.21630859375 0.039474350914502819 0.83131020797942512
 0.375732421875 ...
 0.58617434448078365 0.619153706689038 0.127197265625
 0.90579409144059919 ...
 0.52278101046669945 0.684814453125 0.10243436499289736
 0.20967491728457333 ...
 1 0.0074817781615268558 0.3811632511856291 0.339599609375
 ...
 0.35595869884657466 0.86840613089886087 0.414306640625
 0.11277865463569878 ...
 0.79458641266788621 0.83935546875 0.6529181068049057
 0.94339205682265592 ...
 1 0.35595869884657466 0.16257175915628935 0.0478515625
 0.6529181068049057 ...
 0.68740886937890966 0.305419921875 0.619153706689038
 0.75831237426103459 ...
 0.7353515625 0.981116590883351 0.83131020797942512
 0.587890625 ...
 0.75831237426103459 0.16257175915628935 0.167724609375
 0.46310681496665418 ...
 0.58617434448078365 0.01708984375 0.79458641266788621
 0.068376559524373215 ...
 0.946044921875 0.049468494673688919 0.22738526970373263
 0.7353515625 ...

0.039474350914502819 0.027720313863945266 0.635498046875
 ...
 0.068376559524373215 0.05521337554271482 0.09423828125
 0.03124928092967939 ...
 0.16257175915628935 0.786865234375 0.019117271543546487
 0.035156973095915471 ...
 0.635498046875 0.024540498971091267 0.619153706689038 1
 0.75831237426103459 ...
 0.46310681496665418 0.587890625 0.619153706689038
 0.79458641266788621 ...
 0.786865234375 0.33183160809268897 0.33183160809268897
 0.946044921875 ...
 0.28682732924443766 0.554033858464435 0.892578125
 0.35595869884657466 ...
 0.83131020797942512 1 0.554033858464435
 0.0064899700076656314 ...
 0.010498046875 0.14879179284657834 0.01132237144948544
 0.339599609375 ...
 0.021681703762710124 0.0048532308513795312 0.03271484375
 ...
 0.33183160809268897 0.027720313863945266 0.146484375
 0.1359220216538575 ...
 0.4074344560777356 0.039794921875 0.24613691576742636
 0.46310681496665418 ...
 0.541748046875 0.554033858464435 0.83131020797942512
 0.2734375 ...
 0.981116590883351 0.4074344560777356 0.414306640625
 0.79458641266788621 ...
 0.10243436499289736 0.7353515625 0.05521337554271482
 0.16257175915628935 ...
 0.541748046875 0.075868334994390177 0.12392922503869737
 0.167724609375 ...
 0.12392922503869737 0.28682732924443766 0.305419921875
 0.1359220216538575 ...
 0.092859531430646625 0.146484375 0.22738526970373263
 0.092859531430646625 ...
 0.167724609375 0.28682732924443766 0.26594664610592478
 0.127197265625 ...
 0.33183160809268897 0.20967491728457333 0.10986328125
 0.35595869884657466 ...
 0.49245929748526951 0.146484375 0.554033858464435
 0.28682732924443766 ...
 0.146484375 0.58617434448078365 0.46310681496665418
 0.946044921875 ...
 0.58617434448078365 0.43475617175843212 0.635498046875
 0.79458641266788621 ...
 0.28682732924443766 0.786865234375 0.43475617175843212
 0.30878760631195346 ...
 0.892578125 0.68740886937890966 0.20967491728457333
 0.946044921875 ...
 0.46310681496665418 0.43475617175843212 0.946044921875
 0.554033858464435 ...
 0.24613691576742636 0.497314453125 0.46310681496665418
 0.22738526970373263 ...
 0.684814453125 0.28682732924443766 0.19298546891685994
 0.339599609375 ...
 0.1359220216538575 0.26594664610592478 0.497314453125
 0.084016752511722775 ...
 0.05521337554271482 0.026611328125 0.43475617175843212
 0.068376559524373215 ...

```

0.786865234375 0.26594664610592478 0.52278101046669945
0.684814453125 ...
0.12392922503869737 0.43475617175843212 0.305419921875
0.11277865463569878 ...
0.52278101046669945 0.127197265625 0.94339205682265592
0.619153706689038 ...
0.339599609375 0.79458641266788621 0.14766025556164986
0.06396484375 ...
0.055719324352751176 0.14766025556164986 0.01220703125
0.087935607142362412 ...
0.039474350914502819 0.080322265625 0.024540498971091267
...
0.044233691013677891 0.127197265625 0.0026473530335901756
...
0.044233691013677891 0.021484375 0.0064899700076656314
0.044233691013677891 ...
0.080322265625 0.00226333587285808 0.0086074290379841243
...
0.013427734375 0.26594664610592478 0.012946026127481585
0.635498046875 ...
0.1359220216538575 0.6529181068049057 0.541748046875
0.05521337554271482 ...
0.94339205682265592 0.541748046875 0.035156973095915471
0.33183160809268897 ...
0.454833984375 0.6529181068049057 0.554033858464435
0.305419921875 ...
0.83131020797942512 0.90579409144059919 0.587890625
0.01132237144948544 ...
0.86840613089886087 0.080322265625
0.0074817781615268558], 6, 6, 18);

PPBK = reshape([2.0911240418667978 3.5703125 0.0040075177431870878
0.8386996691382933 ...
1.3583984375 0.029927112646107423 3.4736245235954435
1.6572265625 ...
0.0011722100807699599 0.8386996691382933 1.09375
0.014397426334503093 ...
3.3252408319177005 3.7841796875 0.025959880030662526
1.4238347953862986 ...
1.09375 0.076469086174185949 1.1473093169777506
1.6572265625 ...
0.019412923405518125 1.5246530047425164 3.7841796875
0.19787397869475568 ...
3.0332494970441384 2.7392578125 0.3360670100468911
1.4238347953862986 ...
1.8193359375 1.3273264323707559 3.1783456506715448
2.7392578125 ...
3.0332494970441384 3.4736245235954435 3.5703125
3.4736245235954435 ...
0.016735473319569389 3.7841796875 1.4238347953862986
0.40973745997158945 ...
0.130859375 1.7390246870337285 0.025959880030662526
0.9755859375 ...
0.98454766306970543 0.3360670100468911 0.068359375
1.7390246870337285 ...
0.27350623809749286 2.7392578125 0.77194187566743977
0.59516717138631337 ...
0.19140625 1.0637865844236991 2.21613543385774 1.09375
...

```

3.3252408319177005 2.8902510822830303 1.9892578125
 3.3252408319177005 ...
 1.2351504252478138 3.357421875 0.54368808661543
 3.4736245235954435 ...
 1.6572265625 0.54368808661543 1.7390246870337285
 0.6708984375 ...
 1.1473093169777506 3.1783456506715448 3.5703125
 1.3273264323707559 ...
 3.1783456506715448 0.001953125 1.1473093169777506
 3.1783456506715448 ...
 2.94140625 3.1783456506715448 1.8524272598666167
 0.001953125 ...
 0.98454766306970543 1.6297378243109424 2.7392578125
 3.1783456506715448 ...
 3.9244663635334041 0.1064453125 2.3446973779231346
 2.6116724272196228 ...
 0.5859375 1.6297378243109424 2.6116724272196228
 0.1591796875 ...
 0.90954107881493051 2.21613543385774 3.1474609375
 2.6116724272196228 ...
 2.8902510822830303 1.3583984375 1.969837189941078
 2.7496354775156386 ...
 0.1064453125 0.19787397869475568 3.6231763657623968
 2.94140625 ...
 0.77194187566743977 1.6297378243109424 0.2294921875
 0.27350623809749286 ...
 3.4736245235954435 3.7841796875 0.0055869923560300429
 2.21613543385774 ...
 0.2724609375 0.0040075177431870878 1.2351504252478138
 1.5029296875 ...
 0.0047367721426563808 2.4766148267561521 0.013671875
 0.002850506809752189 ...
 3.4736245235954435 1.6572265625 0.0023964776046722126
 3.7735682272906237 ...
 0.9755859375 0.0033834184906418137 2.0911240418667978
 0.376953125 ...
 0.12499712371871756 1.4238347953862986 0.0244140625
 3.9244663635334041 ...
 2.4766148267561521 0.865234375 0.076469086174185949
 3.7735682272906237 ...
 3.357421875 2.8902510822830303 0.54368808661543
 3.5703125 ...
 1.4238347953862986 1.2351504252478138 0.5859375
 3.4736245235954435 ...
 3.3252408319177005 0.0068359375 1.3273264323707559
 1.7390246870337285 ...
 4 1.0637865844236991 3.7735682272906237 0.0029296875
 3.9244663635334041 ...
 1.1473093169777506 2.5419921875 0.59516717138631337
 0.98454766306970543 ...
 0.0068359375 2.0911240418667978 3.3252408319177005
 1.3583984375 ...
 0.24601570281274143 2.21613543385774 0.3212890625
 1.3273264323707559 ...
 1.0637865844236991 3.7841796875 3.7735682272906237
 0.3360670100468911 ...
 0.130859375 1.4238347953862986 1.2351504252478138
 1.8193359375 ...
 3.0332494970441384 0.14062789238366188 0.2724609375
 2.21613543385774 ...

1.2351504252478138 2.7392578125 3.4736245235954435
 0.49571690015478947 ...
 2.5419921875 0.40973745997158945 3.9244663635334041
 1.8193359375 ...
 0.77194187566743977 1.4238347953862986 2.1669921875
 0.3714381257225865 ...
 3.1783456506715448 1.9892578125 2.7496354775156386
 1.3273264323707559 ...
 1.3583984375 0.0867268150508405 2.3446973779231346
 1.6572265625 ...
 0.98454766306970543 3.7735682272906237 1.5029296875
 0.40973745997158945 ...
 1.969837189941078 0.6708984375 3.6231763657623968
 3.1783456506715448 ...
 1.5029296875 0.039528501360558736 1.4238347953862986
 0.763671875 ...
 0.98454766306970543 3.7735682272906237 1.9892578125
 1.6297378243109424 ...
 2.21613543385774 0.763671875 2.4766148267561521
 0.22085350217085928 ...
 2.94140625 0.15789740365801128 0.49571690015478947
 3.1474609375 ...
 0.27350623809749286 0.59516717138631337 2.7392578125
 0.022472184225995572 ...
 3.1783456506715448 4 0.025959880030662526
 1.3273264323707559 ...
 3.357421875 0.022472184225995572 2.0911240418667978 4
 0.098161995884365069 ...
 1.1473093169777506 3.7841796875 0.3714381257225865
 0.0867268150508405 ...
 2.5419921875 0.30347333997756071 1.1473093169777506
 3.357421875 ...
 0.17693476405471156 0.77194187566743977 1.3583984375
 0.77194187566743977 ...
 3.1783456506715448 3.1474609375 2.21613543385774
 3.6231763657623968 ...
 3.357421875 1.5246530047425164 1.1473093169777506
 0.6708984375 ...
 0.12499712371871756 0.45111461854279511 4
 0.016735473319569389 ...
 2.6116724272196228 2.1669921875 0.010589412134360703
 1.8524272598666167 ...
 3.5703125 0.0065760253193038933 2.8902510822830303
 3.7841796875 ...
 0.00905334349143232 2.7496354775156386 1.8193359375
 0.00168316312671148 ...
 0.14062789238366188 1.09375 0.098161995884365069
 0.65028703662515741 ...
 1.3583984375 0.22085350217085928 1.5246530047425164
 1.09375 ...
 0.12499712371871756 0.70917309021273689 4
 0.0047367721426563808 ...
 1.3273264323707559 1.6572265625 3.7735682272906237
 2.7496354775156386 ...
 2.7392578125 0.3714381257225865 1.2351504252478138
 3.5703125 ...
 0.14062789238366188 0.029927112646107423 2.7392578125
 0.15789740365801128 ...
 0.15789740365801128 1.5029296875 0.045289485797941759
 0.0014061302740298559 ...

0.1591796875 0.025959880030662526 1.4238347953862986
 0.6708984375 ...
 0.0020105202583207823 0.12499712371871756 2.1669921875
 ...
 0.0011722100807699599 0.98454766306970543 0.1064453125
 ...
 0.49571690015478947 1.7390246870337285 0.2724609375
 0.45111461854279511 ...
 3.3252408319177005 0.068359375 0.0040075177431870878
 1.7390246870337285 ...
 1.9892578125 0.0040075177431870878 0.77194187566743977
 ...
 1.6572265625 0.0867268150508405 0.8386996691382933
 0.865234375 ...
 0.076469086174185949 0.90954107881493051 3.357421875
 3.0332494970441384 ...
 0.77194187566743977 2.3515625 3.4736245235954435
 3.6231763657623968 ...
 2.3515625 0.70917309021273689 1.6297378243109424
 2.3515625 ...
 0.65028703662515741 1.5246530047425164 2.94140625
 3.1783456506715448 ...
 3.4736245235954435 2.5419921875 3.1783456506715448
 0.70917309021273689 ...
 1.2216796875 0.98454766306970543 0.40973745997158945
 0.9755859375 ...
 0.59516717138631337 1.8524272598666167 3.1474609375
 1.6297378243109424 ...
 1.6297378243109424 0.763671875 1.5246530047425164
 1.6297378243109424 ...
 1.9892578125 0.90954107881493051 0.77194187566743977
 3.5703125 ...
 0.77194187566743977 2.3446973779231346 0.2724609375
 1.2351504252478138 ...
 3.1783456506715448 2.5419921875 0.70917309021273689
 1.5246530047425164 ...
 0.0419921875 0.77194187566743977 2.6116724272196228
 0.5087890625 ...
 0.65028703662515741 1.4238347953862986 0.9755859375
 0.098161995884365069 ...
 0.27350623809749286 4 0.0867268150508405
 3.1783456506715448 ...
 1.3583984375 0.90954107881493051 1.0637865844236991
 1.9892578125 ...
 1.2351504252478138 0.40973745997158945 0.9755859375
 0.15789740365801128 ...
 0.039528501360558736 3.357421875 0.17693476405471156
 0.3360670100468911 ...
 0.439453125 0.54368808661543 0.70917309021273689
 1.5029296875 ...
 0.8386996691382933 0.17693476405471156 0.1064453125
 2.0911240418667978 ...
 0.0065760253193038933 0.0244140625 2.7496354775156386
 0.3360670100468911 ...
 0.2294921875 0.45111461854279511 0.014397426334503093
 0.0419921875 ...
 1.3273264323707559 1.0637865844236991 0.376953125
 0.12499712371871756 ...
 0.051784104509926342 0.3212890625 0.54368808661543
 0.90954107881493051 ...

3.1474609375 0.3714381257225865 2.6116724272196228
 1.9892578125 ...
 0.27350623809749286 1.7390246870337285 2.94140625
 0.14062789238366188 ...
 2.6116724272196228 0.865234375 0.15789740365801128
 3.3252408319177005 ...
 1.5029296875 2.3446973779231346 2.4766148267561521
 0.5087890625 ...
 3.6231763657623968 2.0911240418667978 2.7392578125
 0.40973745997158945 ...
 0.8386996691382933 4 0.029927112646107423
 1.5246530047425164 ...
 1.3583984375 1.4238347953862986 3.4736245235954435
 1.6572265625 ...
 0.45111461854279511 3.1783456506715448 3.357421875
 2.6116724272196228 ...
 3.7735682272906237 4 1.4238347953862986
 0.65028703662515741 ...
 0.19140625 2.6116724272196228 2.7496354775156386
 1.2216796875 ...
 2.4766148267561521 3.0332494970441384 2.94140625
 3.9244663635334041 ...
 3.3252408319177005 2.3515625 3.0332494970441384
 0.65028703662515741 ...
 0.6708984375 1.8524272598666167 2.3446973779231346
 0.068359375 ...
 3.1783456506715448 0.27350623809749286 3.7841796875
 0.19787397869475568 ...
 0.90954107881493051 2.94140625 0.15789740365801128
 0.11088125545578106 ...
 2.5419921875 0.27350623809749286 0.22085350217085928
 0.376953125 ...
 0.12499712371871756 0.65028703662515741 3.1474609375
 0.076469086174185949 ...
 0.14062789238366188 2.5419921875 0.098161995884365069
 2.4766148267561521 ...
 4 3.0332494970441384 1.8524272598666167 2.3515625
 2.4766148267561521 ...
 3.1783456506715448 3.1474609375 1.3273264323707559
 1.3273264323707559 ...
 3.7841796875 1.1473093169777506 2.21613543385774
 3.5703125 ...
 1.4238347953862986 3.3252408319177005 4
 2.21613543385774 ...
 0.025959880030662526 0.0419921875 0.59516717138631337
 0.045289485797941759 ...
 1.3583984375 0.0867268150508405 0.019412923405518125
 0.130859375 ...
 1.3273264323707559 0.11088125545578106 0.5859375
 0.54368808661543 ...
 1.6297378243109424 0.1591796875 0.98454766306970543
 1.8524272598666167 ...
 2.1669921875 2.21613543385774 3.3252408319177005
 1.09375 ...
 3.9244663635334041 1.6297378243109424 1.6572265625
 3.1783456506715448 ...
 0.40973745997158945 2.94140625 0.22085350217085928
 0.65028703662515741 ...
 2.1669921875 0.30347333997756071 0.49571690015478947
 0.6708984375 ...

```

0.49571690015478947 1.1473093169777506 1.2216796875
0.54368808661543 ...
0.3714381257225865 0.5859375 0.90954107881493051
0.3714381257225865 ...
0.6708984375 1.1473093169777506 1.0637865844236991
0.5087890625 ...
1.3273264323707559 0.8386996691382933 0.439453125
1.4238347953862986 ...
1.969837189941078 0.5859375 2.21613543385774
1.1473093169777506 ...
0.5859375 2.3446973779231346 1.8524272598666167
3.7841796875 ...
2.3446973779231346 1.7390246870337285 2.5419921875
3.1783456506715448 ...
1.1473093169777506 3.1474609375 1.7390246870337285
1.2351504252478138 ...
3.5703125 2.7496354775156386 0.8386996691382933
3.7841796875 ...
1.8524272598666167 1.7390246870337285 3.7841796875
2.21613543385774 ...
0.98454766306970543 1.9892578125 1.8524272598666167
0.90954107881493051 ...
2.7392578125 1.1473093169777506 0.77194187566743977
1.3583984375 ...
0.54368808661543 1.0637865844236991 1.9892578125
0.3360670100468911 ...
0.22085350217085928 0.1064453125 1.7390246870337285
0.27350623809749286 ...
3.1474609375 1.0637865844236991 2.0911240418667978
2.7392578125 ...
0.49571690015478947 1.7390246870337285 1.2216796875
0.45111461854279511 ...
2.0911240418667978 0.5087890625 3.7735682272906237
2.4766148267561521 ...
1.3583984375 3.1783456506715448 0.59064102224659942
0.255859375 ...
0.2228772974110047 0.59064102224659942 0.048828125
0.35174242856944965 ...
0.15789740365801128 0.3212890625 0.098161995884365069
0.17693476405471156 ...
0.5087890625 0.010589412134360703 0.17693476405471156
0.0859375 ...
0.025959880030662526 0.17693476405471156 0.3212890625
0.00905334349143232 ...
0.0344297161519365 0.0537109375 1.0637865844236991
0.051784104509926342 ...
2.5419921875 0.54368808661543 2.6116724272196228
2.1669921875 ...
0.22085350217085928 3.7735682272906237 2.1669921875
0.14062789238366188 ...
1.3273264323707559 1.8193359375 2.6116724272196228
2.21613543385774 ...
1.2216796875 3.3252408319177005 3.6231763657623968
2.3515625 ...
0.045289485797941759 3.4736245235954435 0.3212890625
0.029927112646107423 ...
], 6, 6, 18);

```

```

c = ...
[1 2;

```

```

1 3;
1 4;
2 3;
2 4;
3 4];

cc = cell(4, 1);
cc{1,1} = 'm1';
cc{2,1} = 'm2';
cc{3,1} = 'm3';
cc{4,1} = 'm4';

cond = 'Thorax3';

conds = cell(18, 1);
conds{1,1} = 'Hip1';
conds{2,1} = 'Hip2';
conds{3,1} = 'Hip3';
conds{4,1} = 'Knee1';
conds{5,1} = 'Knee2';
conds{6,1} = 'Knee3';
conds{7,1} = 'Ankle1';
conds{8,1} = 'Ankle2';
conds{9,1} = 'Ankle3';
conds{10,1} = 'FootProgress1';
conds{11,1} = 'FootProgress2';
conds{12,1} = 'FootProgress3';
conds{13,1} = 'Pelvis1';
conds{14,1} = 'Pelvis2';
conds{15,1} = 'Pelvis3';
conds{16,1} = 'Thorax1';
conds{17,1} = 'Thorax2';
conds{18,1} = 'Thorax3';

dat = saveVarsMat.dat; % <51x4x17 double> too many elements

h = true;

i = 18;

j = 6;

mafc = ...
[-7.3833366755808507 -5.9465992542019386 -6.8612569492687889 -
6.7840914095283154 ...
;
0 -11.607397125017899 -11.459755655182303 -12.976062373592976;
-7.7890211289078186 -8.8683081699082855 -10.043299193345675 -
8.3057941758152936 ...
;
-8.93317349673754 -9.18570337102462 -8.8623886904678564 -
10.63414337458374 ...
;
-14.917991865515475 -17.164232206862476 -17.448091864662803 -
17.033719122200534 ...
;
-9.2047062181927188 -9.7330924821696065 -8.9662254434826174 -
8.7059917296676712 ...
;

```

```

-9.1499949141628356 -7.9469649060058591 -4.058266814549726 -
8.6816466777837853 ...
;
-6.3373947887068738 -7.24608304979102 -7.18011204312195 -
7.5841724687080836 ...
;
-7.8654159869771583 -10.032851905913335 -9.60312661495581 -
8.440940459555959 ...
;
-9.3093544826532266 -8.0178291788789036 -6.5879682782417444 -
7.9105201470193443 ...
;
-11.466941527101406 -13.653933533448836 -13.752273869730191 -
14.338740779050553 ...
;
-15.659724122060886 -19.049751171164306 -18.883926178515853 -
18.013725083866881 ...
;
-7.5821399102266 -8.3664907014300027 -10.479524817934495 -
9.3138852245558237 ...
;
-6.6402676070046773 -8.6741895121322088 -8.3522740969777729 -
10.025198039545776 ...
;
-5.4105964306207843 -6.6178738559731558 -6.0670651407919376 -
4.1261076726976631 ...
;
-10.350955468268049 -8.39063862447095 -12.265147586596781 -
11.822777613691878 ...
;
-7.2961261183556791 -9.0791044989005911 -10.647301978685356 -
8.6839259337496628 ...
];

mams = ...
[9.6852040845370535 14.214747543603476 14.131741821419073
13.778969863004148 ...
;
0 15.319611534112365 14.199375234918945 14.226517133313129;
7.739097981078074 7.0626992680212659 7.0295299993576137
7.0789504744247722 ...
;
9.4621074875854312 10.731610520076826 11.808680159546544
7.60744428137434 ...
;
10.458698979955484 13.089496948576121 14.859829334782336
14.610309432559189 ...
;
12.819459720740991 10.625403389949698 13.231275825886408
11.935047473497169 ...
;
6.8685972507976354 9.48173862724652 12.846518672343487
10.315584384569505 ...
;
11.850931538503794 10.687735859301345 8.48998598763349
7.948640012817755 ...
;
12.946866647039229 13.002644589558678 14.665758380245713
13.372923558114516 ...
;

```

```

13.693069930705702 15.309571092922976 13.972804293208855
15.891134075010113 ...
;
6.3064945813720579 6.646787642101196 7.1073812681946649
4.6935085385742337 ...
;
10.671867107489291 11.535052599573211 12.767091070390935
10.146335044189879 ...
;
9.0385734984899138 7.8208910948687542 5.2174422957905371
6.711336423700379 ...
];

mato = ...
[14.502701088755249 19.83491545349262 20.048776531123249
19.714051841034667 ...
;
0 22.370558296062573 21.095470919538538 21.379919953184494;
12.389187643340302 12.460174558294149 11.937789927468037
12.248219463924157 ...
;
13.475471743405246 14.123579571420034 14.180382626209029
11.61344270426766 ...
;
6.2988565577106694 4.85933287698601 6.1736448346303208
6.2477050026875869 ...
;
13.460077350789684 16.073221089539238 17.228370124696063
12.210826786971149 ...
;
16.851759043390285 17.465913431858514 21.052161885294595
17.60729877456459 ...
;
13.664397946276734 17.568836613310417 19.585716381079674
18.904579997022932 ...
;
16.180510762140468 16.285649656959123 18.929950734694945
17.239332388586455 ...
;
12.354380857034313 15.573805121848963 18.432018076747365
16.311257402195334 ...
;
15.808498636930336 17.089707722279975 14.727801631606464
14.37553206384214 ...
;
18.7609380262197 20.401555801754384 22.127330307831286
21.739919246032521 ...
;
17.459720072451237 19.07114406370798 19.242942275108735
19.506576307259081 ...
;
9.886718204254576 11.048672993037577 11.61633417947542
9.8052661371486618 ...
;
15.076604233293585 15.561991797415237 17.396794734911023
16.314021238242979 ...
;
15.551424925586796 15.804523277105911 17.846079114363093
15.259745852113166 ...
;

```

```

12.475132008530306 12.283143128229534 11.263660776776419
12.354624075801787 ...
];

mifc = ...
[-9.2658066727839916 -8.204328291389313 -9.0756991516411052 -
9.0908088961230078 ...
;
0 -13.79587755377001 -13.765458580593762 -15.295849890556394;
-9.9787739476090636 -11.412094741896716 -12.782728913755641 -
11.087457937648276 ...
;
-10.612296143810639 -10.033622900861277 -10.106580969108895 -
11.640867450577822 ...
;
-16.653837053764761 -19.255297404298371 -19.820522537364113 -
19.44382018765555 ...
;
-12.0369757052971 -12.431114556280983 -11.791758965193358 -
11.0323177730469 ...
;
-10.944567102669456 -9.4190577557934549 -5.8967983564834574 -
10.236865333423 ...
;
-7.6990443008380494 -8.8510655850288948 -9.1225132587259949 -
9.5646476775752269 ...
;
-10.283675223814717 -12.092344662262928 -11.857441223214687 -
10.780569854276807 ...
;
-11.809801870381298 -10.520836296515737 -8.8998388346418729 -
10.615023068377646 ...
;
-13.116770129581278 -14.781931601743223 -14.676809905720351 -
15.339847578623404 ...
;
-18.071372562626493 -21.920174256154127 -21.679905959644934 -
20.701692712706805 ...
;
-10.135314379664033 -11.069472607634809 -12.799374084762961 -
11.834731612620677 ...
;
-8.4510669114766213 -10.566810451601073 -10.460922645512673 -
12.095326966789882 ...
;
-7.93545460768324 -9.58153749742088 -8.972572430551935 -
7.0200890902608828 ...
;
-12.591738041541879 -10.587503553192748 -14.601424216131782 -
14.3877186960595 ...
;
-8.3457059785916972 -9.96363051358003 -11.728960925303795 -
9.6501406644964245 ...
];

mims = ...
[-8.3656319324780739 -7.1422336274571929 -8.0216649987451412 -
7.9813004180540306 ...
;
0 -12.821135891685925 -12.719337722989129 -14.2479741751614;

```

```

-8.8526957427317079 -10.118268011199465 -11.389741962163228 -
9.680562197056469 ...
;
-10.689177900895976 -11.143399259170458 -10.463572676316724 -
9.8359239125182985 ...
;
-7.01179663839152 -8.01496667065726 -8.104418635568063 -
8.5283800374456522 ...
;
-9.1204747361966909 -11.113596309454195 -10.778912603893103 -
9.6284233546721119 ...
;
-10.602192789887797 -9.2854386462854173 -7.749908781003664 -
9.2570512613497442 ...
;
-12.374424612521782 -14.30927572016445 -14.255699676566396 -
14.878328790697923 ...
;
-16.982691385284969 -20.585900301003303 -20.364121096248404 -
19.454710644712723 ...
;
-8.94753661485829 -9.79863605244967 -11.712791741978046 -
10.667529892818758 ...
;
-7.5739594671746451 -9.6751472210763652 -9.4630890369398166 -
11.170787280571554 ...
;
-11.606993957551119 -9.5822177173715435 -13.562784837273565 -
13.203525616770705 ...
;
-7.84593850629831 -9.5135866800742157 -11.152204160621761 -
9.1194165169361341 ...
];

mito = ...
[13.089882273337921 18.166286274567817 18.239794213255223
17.884236498257678 ...
;
0 20.311603012381 19.163848167958012 19.411016360113635;
11.47606504083905 11.17202507541365 10.870972724824689
11.107556606193686 ...
;
12.54278689058526 12.949986994972784 12.968365442058772
10.300122792904016 ...
;
5.3390091563793165 3.3275961749732414 5.1727836790420607
5.2530678174447489 ...
;
12.535113255540271 14.543004873915171 15.644198773156086
11.002744127707997 ...
;
15.328402989295526 16.145174303172649 19.402682924877674
16.031515182462272 ...
;
12.6311987636436 16.890258480122025 18.908457289257509
18.431326214113174 ...
;
15.684666807869329 14.758444816127295 17.583853341929004
15.985720646992696 ...
;

```

```

10.482964937467541 13.610557304724226 16.759055331215929
14.454755009482392 ...
;
15.055298270238882 15.320805173734694 13.121214863485985
12.748263699236908 ...
;
17.335874160116905 18.496732742240241 20.347246544024866
19.4418933984589 ...
;
16.532372438834745 18.320447433575659 17.888183291181473
18.815328460980258 ...
;
8.8373330614933 9.7248535773843088 10.224416991043682
8.1924882441274889 ...
;
13.811410126793918 14.586047192664028 16.446375004756533
15.288168752224715 ...
;
14.106576245760058 14.556684597815666 16.42898825074694
13.786357538248534 ...
;
11.700057151644458 11.12605243485852 9.576331139156423
10.699830128995323 ...
];

mm = [16.640307356562015 15.460724660875258];

p = [0.14040838800341943 0.075925850377015408 0.032243024467318658
0.094175986015732072 ...
0.24066188520961562 0.014881086386441384];

pdmafc = [14.319939480410682 15.287528817945244 16.197985882639998
1.1293051518250792 ...
2.1919293600404615 1.0747615457210458];

pdmams = [16.482754818921535 19.149165613668245 12.128493379717241
3.1926469664624335 ...
-5.21360759656713 -8.6834876686663733];

pdmato = [16.306137190260444 20.746522180037658 14.699843705386556
5.3055084813942557 ...
-1.9192488325284529 -7.6295433853226626];

pdmifc = [12.985929924781104 14.471837167468962 15.196793836600392
1.7076631875780208 ...
2.5408119743256492 0.84762333846796878];

pdmims = [16.163293695239645 19.877842874112986 18.746810732006224
4.4306955062980791 ...
3.081606077623178 -1.4116346622191855];

pdmito = [15.375631221418232 20.196486631203712 13.543016023758597
5.69676971227895 ...
-2.1655880263693632 -8.3373153970018876];

pmafc = [1.4241882539901121E-14 2.1373223495735844E-16
2.1412114647460264E-16 ...
2.1402240561094041E-16];

```

```

pmams = [5.2043201611769826E-11 7.5639452925435363E-13
7.5639845351419333E-13 ...
7.5645263463245439E-13];

pmato = [1.4241851723869191E-14 2.1374147128981091E-16
2.1373221868424738E-16 ...
2.1373221671291292E-16];

pmifc = [1.424185157606985E-14 2.1373221343901271E-16
2.1373224256989886E-16 ...
2.1373221345643781E-16];

pmims = [5.2043201222798747E-11 7.5639452862611137E-13
7.5639452860644614E-13 ...
7.5639452860627943E-13];

pmito = [1.4241897643833943E-14 2.2072801385160147E-16
2.1373402621213654E-16 ...
2.1373338919038244E-16];

ppmafc = [0.044233691013677891 0.044233691013677891
0.012946026127481585 ...
0.94339205682265592 0.554033858464435 0.86840613089886087];

ppmams = [0.127197265625 0.080322265625 0.635498046875 0.541748046875
0.305419921875 ...
0.080322265625];

ppmato = [0.0026473530335901756 0.00226333587285808 0.1359220216538575
...
0.035156973095915471 0.83131020797942512
0.0074817781615268558 ...
];

ppmifc = [0.039474350914502819 0.044233691013677891
0.0086074290379841243 ...
0.6529181068049057 0.33183160809268897 0.90579409144059919];

ppmims = [0.080322265625 0.021484375 0.013427734375 0.541748046875
0.454833984375 ...
0.587890625];

ppmito = [0.024540498971091267 0.0064899700076656314
0.26594664610592478 ...
0.05521337554271482 0.6529181068049057 0.01132237144948544];

t = [1 2.98 4.96 6.94 8.92 10.9 12.88 14.86 16.84 18.82 20.8 22.78
24.76 ...
26.74 28.72 30.7 32.68 34.66 36.64 38.62 40.6 42.58 44.56 46.54
48.52 ...
50.5 52.48 54.46 56.44 58.42 60.4 62.38 64.36 66.34 68.32 70.3
72.28 ...
74.26 76.24 78.22 80.2 82.18 84.16 86.14 88.12 90.1 92.08 94.06
96.04 ...
98.02 100];

clear saveVarsMat;

```

Dank

Ich bedanke mich von ganzem Herzen bei:

- Marlene Mauch, Didier Staudenmann und Wolfgang Taube für ihre Betreuung und ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.
- Der Rennbahnklinik für die Bereitstellung aller Gerätschaften.
- Allen Probanden für die Kooperationsbereitschaft.
- Meinem Ehemann Sascha und meinen Eltern für die liebevolle Unterstützung und den Ansporn bei der Entstehung dieser Arbeit.